

Уважаемые коллеги, участники конференции!

Украина является одной из немногих стран в мире, в которой ведётся разработка и производство современной бронетехники. Несмотря на пессимистические прогнозы некоторых зарубежных и отечественных военных специалистов, бронетанковая техника остаётся основной ударной силой сухопутных войск и альтернативы ей в ближайшем будущем не предвидится.

В то же время непрерывная трансформация задач и форм ведения военных действий выдвигает всё новые и новые требования к тактико-техническим характеристикам танков, БМП и БТР. Качественно новой составляющей развития танкостроения в последнее десятилетие стала интеграция машин в единую боевую систему.

Всё это, наряду с необходимостью непрерывного сокращения сроков разработки, изготовления и испытания образцов, требует новых подходов к проектированию, особенно на ранних стадиях, консолидации творческих и интеллектуальных усилий большого числа специалистов и учёных различных областей знаний.

Поэтому конференция ИТЭ–2009, проводимая в этом году под патронатом концерна «Бронетехника Украины», является очередным этапом в развитии украинского бронетанкостроения.

Желаю участникам конференции плодотворной работы и творческих успехов.

Сопредседатель оргкомитета  
Генеральный конструктор по созданию  
бронетанковой техники и  
артиллерийских систем,

Член-корреспондент НАН Украины



М.Д. Борисюк

**ОПТИМІЗАЦІЯ РЕЖИМІВ СПІЛЬНОЇ РОБОТИ НАГРІВАЛЬНОЇ ПЕЧІ  
Й ПРОКАТНОГО СТАНУ З ВИКОРИСТАННЯМ ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧИХ ЕКРАНІВ**

Сучасний підхід до енерго- і ресурсозбереження передбачає системний, комплексний аналіз споживання, як матеріальних, так і енергетичних ресурсів. Такий аналіз повинен ураховувати взаємний вплив основних режимних і технологічних параметрів роботи різних агрегатів на вартість одержання готового продукту. У цьому сенсі, для прокатного переділу, актуальною є задача розгляду режимів спільної роботи нагрівальної печі та прокатного стану. Вибір раціональних режимів спільної роботи дозволяє знизити собівартість готового прокату.

Практичний інтерес представляє дослідження ефективності установки енергозберігаючих екранів над рольгангом. Установка екранів забезпечує зниження втрат теплоти розкатом при прокатці, що дозволяє знизити кінцеву температуру нагрівання заготовок у печі, величину вигорання металу у окалину. При цьому підвищується витрата електроенергії при прокатці. Наявність цих факторів дозволяє сформулювати задачу оптимізації, у якій критерієм оптимальності виступає мінімум сумарних витрат на виробництво готового прокату на ділянці "нагрівальна піч-прокатний стан" ("піч-стан").

**Постановка задачі.** У якості цільової функції доцільно розглядати сумарну собівартість продукції при виробництві готового прокату на ділянці "піч - стан", яка може бути визначена як:

$$C_{\text{ГОТ}} = C_M + C_M \cdot m_{\text{ВИГ}} + C_{\text{П}} \cdot b_{\text{П}} + C_{\text{ЕЕ}} \cdot b_{\text{ЕЕ}} + C_{\text{ІНШ}}, \quad (1)$$

де  $C_M$  – вартість заготовки перед посадом у нагрівальну піч, грн./т;  $C_{\text{П}}$ ,  $C_{\text{ЕЕ}}$  – відповідно, вартість палива, використаного в нагрівальних печах і вартість електроенергії витраченої на прокатному стані, грн./кг у.п.;  $m_{\text{ВИГ}}$  – питома кількість металу, що вигорів у окалину, т/т;  $b_{\text{П}}$ ,  $b_{\text{ЕЕ}}$  – відповідно, питома витрата палива й електроенергії, кг у.п./т.;  $C_{\text{ІНШ}}$  – питома вартість інших (умовно-постійних) витрат, грн/т.

У рівнянні (1) можна виділити дві складові – постійну, що не залежить від роботи системи "піч-стан", – це складові  $C_M$ ,  $C_{\text{ІНШ}}$ , і перемінну, котра змінюється залежно від зміни режиму роботи системи "піч-стан" – це складові  $C_M \cdot m_{\text{ВИГ}}$ ;  $C_{\text{П}} \cdot b_{\text{П}}$ ;  $C_{\text{ЕЕ}} \cdot b_{\text{ЕЕ}}$ . Таким чином, мінімум цільової функції досягається при мінімізації величини перемінної частини витрат на виробництво прокату.

При спільному розгляданні режимів роботи нагрівальної печі та прокатного стану можна виділити наступні технологічні фактори, що виступають у реальних умовах, як обмеження, при формулюванні задачі оптимізації [1].

1. Температура нагріву металу в печі або температура початку прокатки повинна знаходитися у діапазоні, що обумовлений технологічними вимогами для різних марок сталі. Для вуглецевих марок вона складає 1200–1060 °С.

2. Кінцева температура прокатки регламентується вимогами до структури й властивостей готової продукції і для вуглецевих і конструкційних сталей складає 800–900 °С, для інструментальних сталей складає 700–900 °С.

3. Припустимі зусилля прокатки, які забезпечують надійну й стабільну роботу устаткування без зниження міжремонтного періоду, встановлюються для кожного стану окремо.

При роботі стану з енергозберігаючими екранами додаються обмеження на роботу екранів.

4. Температура поверхні екрана  $t_{\text{ПЕ}}$  визначається товщиною ізоляції, виходячи з вимог техніки безпеки, не повинна перевищувати 70 °С.

5. Термін служби екранів,  $\tau_{\text{Е}}$ , повинен перевершувати строк окупності установки екранів на рольгангу. Для реальних умов роботи, мінімальний термін служби екранів визначається гарантійним строком експлуатації волокнистої ізоляції, при максимальних температурах застосування, що становить 3–5 років.

Рішення задачі оптимізації виконано для умов роботи середньосортного стану 550-2 ВАТ "Дніпропетровський металургійний завод ім. Петровського".

Таким чином, постановка задачі оптимізації, в остаточному виді, формулюється в такий спосіб: забезпечити мінімум змінної частини собівартості готового прокату

$$C_{\text{П}} = C_M \cdot m_{\text{ВИГ}} + C_{\text{П}} \cdot b_{\text{П}} + C_{\text{ЕЕ}} \cdot b_{\text{ЕЕ}} \rightarrow \min, \quad (2)$$

при наступних обмеженнях:

– температура нагріву металу перед прокаткою, °С

$$1060 \leq t_H \leq 1200, \quad (3)$$

– температура кінця прокатки, °С

$$800 \leq t_K \leq 900, \quad (4)$$

– допустимі зусилля прокатки, МН

$$\sigma \leq 3,0 - 3,6, \quad (5)$$

– температура поверхні екрана, °С

$$t_{ПЕ} \leq 70, \quad (6)$$

– термін служби екранів, рік

$$\tau_E \geq 3. \quad (7)$$

Рішення задачі оптимізації передбачає створення комплексного математичного опису роботи системи "піч–стан", що включає:

1) Модель роботи методичної печі, з визначенням температури кінця нагрівання металу у печі й величини окалини, що утворюється при нагріванні в печі, при заданій продуктивності печі й заданому перепаді температури по товщині заготовки на видачі [2]. Модель заснована на відомій інженерній методиці розрахунку теплообміну в системі "газ–кладка–метал" та методі теплової діаграми.

2) Модель зміни температурного поля розкату і екрану, при заданому темпі прокатки [3], що дозволяє визначати розподіл температури по перетину розкату й екрану під час прокатки, у досліджуваному діапазоні параметрів. Модель заснована на використанні чисельного вирішення сумісної задачі теплообміну раскату – екран рольганг з використанням методу кінцевих різниць.

3) Модель процесу деформації заготовки з визначенням зусиль прокатки й витрат електроенергії на стані, при заданих температурних умовах і калібруванні стану. Визначення витрати електроенергії при прокатці виконано шляхом розрахунку потужності, що споживана електродвигунами стану, на основі енергосилових параметрів прокатки [4, 5].

**Результати досліджень.** В результаті рішення задачі оптимізації, отримана область температури нагріву заготовок у печі: 1060–1100 °С, що відповідає мінімальному значенню змінної частини собівартості готового прокату  $C_{П}$ , у всьому дослідженому діапазоні продуктивності системи "піч–стан". Зміна величини  $C_{П}$  у цьому діапазоні температур не перевищує 1,4 %. При збільшенні температури нагріву вище 1100 °С,  $C_{П}$  нелінійно зростає й збільшується на 4,6–4,9 % при температурі 1150 °С і на 9–12 % при температурі 1200 °С. Таким чином, зниження температури нагріву з 1200 °С до оптимального значення з діапазону 1060–1100 °С дозволяє знизити змінну частину собівартості готового прокату на 9–12 %. З урахуванням початкової вартості металу, оптимальний діапазон температури нагріву металу дозволяє знизити собівартість прокату на 0,3–0,7 %.

Наведені результати проілюстровані на рисунках 1 і 2. На рисунку 1 наведено зміна перемінної частини собівартості прокату від температури нагріву для продуктивності 80 т/год. На рисунку 2 наведено зміна складових перемінної частини собівартості прокату від температури нагріву на екранованому рольгангу з товщиною екрана 0,3 м.

Розрахунки показали, що зміна перемінної частини вартості прокату, при зниженні температури нагріву в печі, в основному визначається зниженням вартості вигорання металу в окалину, а не зміною співвідношення вартості природного газу  $C_{ПГ}$  й електроенергії  $C_{ЕЕ}$ . Це підтверджується даними, що наведено на рисунках 3 і 4.

В результаті аналізу розрахункових даних отримано, що для реальних умов роботи прокатного стану 550-2 необхідно забезпечити температуру початку прокатки 1150 °С, що, з одного боку, знизить перемінну частину собівартості прокату на 5–8 %, а з іншого боку, забезпечить якість прокату й роботу стану в припустимому діапазоні навантажень, виключить охолодження розкату нижче припустимих значень температури, при короткочасних зупинках і затримках на стані. При цьому температура кінця прокатки практично не зміниться й складе 840–850 °С.

Для оцінки економічної ефективності екранування рольгангу виконано розрахунок економічної ефективності установки екранів для умов стану 550-2 ВАТ "Дніпропетровський металургійний завод ім.

Петровського". У результаті розрахунків отримано, що при зниженні температури нагріву металу в печі на 50 °С з 1200 до 1150 °С, строк окупності установки екранів складає близько 0,5 року.

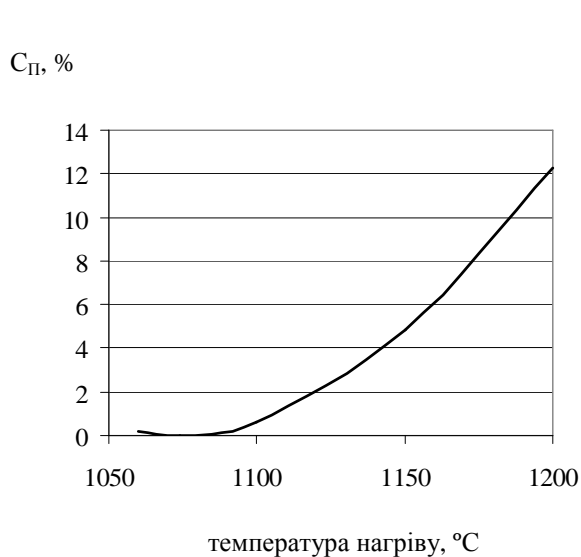


Рисунок 1 – Відносна зміна перемінної частини собівартості прокату, при продуктивності 80 т/год

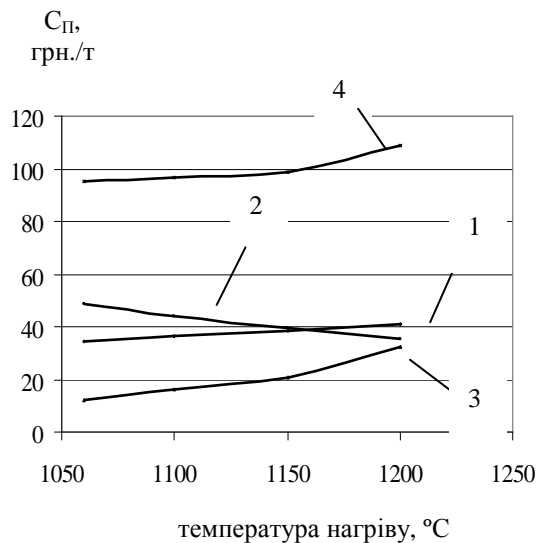


Рисунок 2 – Перемінна частина собівартості прокату:  
 1 – вартість природного газу;  
 2 – вартість електроенергії;  
 3 – вартість металу, що вигорів;  
 4 – змінна частина собівартості прокату

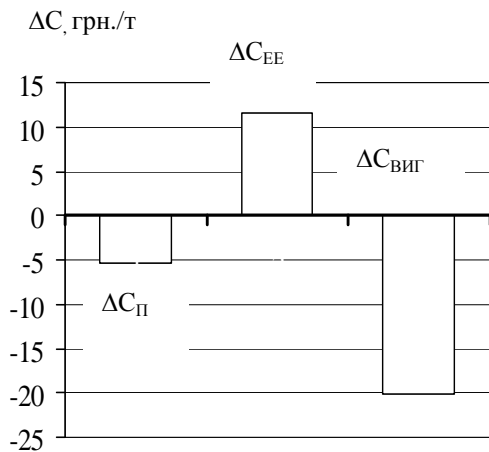


Рисунок 3 – Зміна питомої вартості палива  $\Delta C_{\text{п}}$ , електроенергії  $\Delta C_{\text{ЕЕ}}$ , вигорання металу  $\Delta C_{\text{ВІГ}}$  при зниженні температури початку прокату з 1200 до 1100 °С

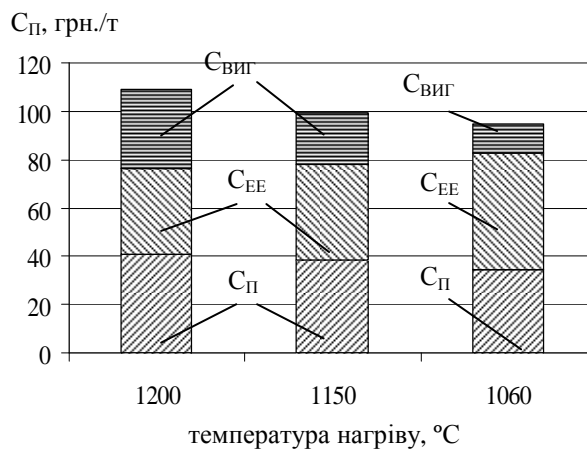


Рисунок 4 – Зміна структури перемінної частини собівартості прокату для продуктивності 80 т/год.:  
 $C_{\text{п}}$  – вартість палива, грн./т;  
 $C_{\text{ЕЕ}}$  – вартість електроенергії, грн./т;  
 $C_{\text{ВІГ}}$  – вартість металу, що вигорів, грн./т

**Висновки.** У результаті рішення задачі оптимізації спільної роботи нагрівальної печі та прокатного стану, з установкою енергозберігаючих екранів, для умов сортопрокатного стану 550-2 ВАТ "Дніпропетровський металургійний завод ім. Петровського", отримано, що оптимальна температура нагріву

заготовок у печі складає діапазон 1060–1100 °С. З урахуванням реальних умов роботи сортопрокатного стану, рекомендується забезпечити температуру нагріву заготовок – 1150 °С, що знизить собівартість готового прокату на 0,2–0,5 % і забезпечить дотримання всіх технологічних і технічних вимог при роботі системи "піч–стан". Строк окупності установки екранів, при цьому, складає близько 0,5 року.

Література

1. Технологическая инструкция по производству сортового проката на стане 550-2 прокатного цеха №2. ТИ-233-ПС-02-96.
2. Пульпинский Б.Б. Разработка и внедрение энергосберегающего режима нагрева металла в проходных печах методического типа. // Сб. научн. тр. НМетАУ. – Днепропетровск: НМетАУ. – 2000. – С. 113–118.
3. Перерва В.Я., Решетняк С.И. Моделирование охлаждения заготовок на сортовом стане при установке теплоизолирующих экранов // Metallurgicheskaya teplotekhnika. Сборник научных трудов Национальной Metallurgicheskoy akademii Ukrainy. – Днепропетровск: Пороги, 2004. – С. 67–75.
4. Перерва В.Я., Огинский И.К., Самсоненко А.А., Пульпинский В.Б. Исследование энергопотребления в сортопрокатном производстве при использовании теплоизолирующих экранов // Metallurgicheskaya teplotekhnika. Збірник наукових праць Національної металургійної академії України. У двох книгах. Книга друга. – Дніпропетровськ: Пороги, 2005. – С. 190–197
5. Груднев А.П. Технология прокатного производства / А.П. Груднев, Л.Ф. Машкин, М.И. Ханнин. – М.: Арт-Бизнес-Центр, Metallurgiya, 1994. – 520с.

Bibliography (transliterated)

1. Tehnologicheskaja instrukcija po proizvodstvu sortovogo prokata na stane 550-2 prokatnogo ceha #2. ТИ-233-ПС-02-96.
2. Pul'pinskij V.B. Razrabotka i vnedrenie jenergosberegajushhego rezhima nagreva metalla v prohodnyh pechah metodicheskogo tipa. Sb. nauchn. tr. NMetAU. – Dnepropetrovsk: NMetAU. – 2000. – p. 113–118.
3. Pererva V.Ja., Reshetnjak S.I. Modelirovanie ohlazhdenija zagotovok na sortovom stane pri ustanovke teploizolirujushhih jekranov Metallurgicheskaja teplotekhnika. Sbornik nauchnyh trudov Nacional'noj Metallurgicheskoy akademii Ukrainy. – Dnepropetrovsk: Porogi, 2004. – p. 67–75.
4. Pererva V.Ja., Oginskij I.K., Samsonenko A.A., Pul'pinskij V.B. Issledovanie jenergopotreblenija v sortoprokatnom proizvodstve pri ispol'zovanii teploizolirujushhih jekranov Metalur-gijna teplotekhnika. Zbirnik naukovih prac' Nacional'noї metalurgijnoї akademii Ukraїni. U dvoh knihah. Kniga druga. – Dnipropetrovsk: Porogi, 2005. – p. 190–197
5. Grudnev A.P. Tehnologija prokatnogo proizvodstva / A.P. Grudnev, L.F. Mashkin, M.I. Hanin. – M.: Art-Biznes-Centr, Metallurgija, 1994. – 520 p.

УДК 621.771.25.04.001.5

Перерва В.Я., Шевченко Г.Л., Губинский М.В.

**ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ СОВМЕСТНОЙ РАБОТЫ НАГРЕВАТЕЛЬНОЙ ПЕЧИ И ПРОКАТНОГО СТАНА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ ЭКРАНОВ**

Сформулирована и решена задача оптимизации совместной работы нагревательной печи и сортопрокатного стана при установке энергосберегающих экранов над рольгангом.

Получен оптимальный диапазон температуры нагрева металла в печи, при котором стоимость готового проката в исследованном диапазоне параметров, снижается на 0,2–0,5 %.

Pererva V., Shevchenko G., Gubinskiy M.

**THE OPTIMIZATION OF THE JOINT WORK OF THE HEATING FURNACE AND TABLE ROLLING WITH THE ENERGY-SAVING SCREENS INSTALLATION WAS SOLVED**

The optimization task of the joint work of the heating furnace and table rolling with the energy-saving screens installation was solved.

An optimal temperature range of the metal heat in the furnace ensuring reduction in the finished steel value at 0,2–0,5 %, was received.

**ШЛЯХИ ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ ПОВЕРХНЕВО-АКТИВНИХ РЕЧОВИН (ПАР) ПРИ ЕКСТРАГУВАННІ ГЕПАРИНУ У ПСЕВДОЗРІДЖЕНОМУ ШАРІ**

**Актуальність та мета дослідження.** Підвищення ціни на енергоносії залишається вагомим проблемою для сучасних підприємств різних галузей промисловості. Підприємства з виробництва органопрепаратів гостро відчують цю проблему. Удосконалення технологічних процесів із застосуванням енергозберігаючих технологій залишається актуальним питанням сьогодення.

Розглянувши технологічну схему виробництва гепарину [1, с. 113–116], бачимо, що це складний багатоступінчастий процес, енерговитратний. Збільшення маси виходу екстракту субстанції гепарину за одиницю часу при стандартних енерговитратах дасть можливість інтенсифікувати процес виробництва гепарину в цілому.

Збільшення виходу цільового компоненту при екстрагуванні можна забезпечити зменшенням середньої товщини приповерхневого ламінарного (Л) шару  $\delta$ , що виникає навколо подрібненої частинки сировини при її турбулентному осадженні, в нашому випадку подрібнених легенів забійних тварин, оскільки в ньому концентрується 98 % всього дифузійного опору системи тверда частинка–потік екстрагента (рис. 1). [2]

Для визначення товщини ламінарного шару необхідними є характеристики коефіцієнта поверхневого натягу, коефіцієнта динамічної в'язкості екстрагента. Ці залежності нами запропоновані раніше [3]. Якщо такі характеристики мінімальні, то і товщина приповерхневого шару також зменшується. Виробництво органопрепаратів проходить з використанням рухомої апаратури, тому велике значення критерію Рейнольдса буде мати позитивний вплив на безпосередній процес екстрагування [4].

Сировиною для отримання гепарину є легені забійних тварин, які є капілярно-пористим матеріалом. В таких випадках концентраційна ситуація на поверхні частинок постійно змінюється [5, с. 63–64], а із зменшенням товщини приповерхневого шару інтенсифікація екстрагування зростає ще більше, як показано на рис. 1.

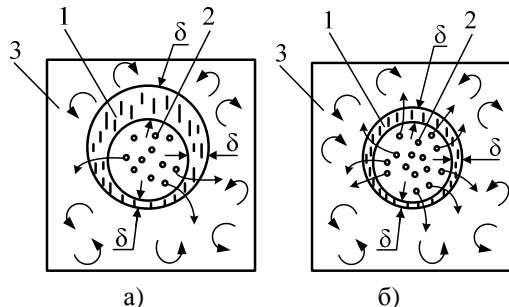


Рисунок 1 – Схема виходу екстракту з частинки сировини через приповерхневий Л шар:  
 а) без ПАР, б) з додаванням ПАР,  
 1 – приповерхневий Л шар, 2 – цільовий компонент (подрібнена частинка сировини),  
 3 – турбулентний потік екстрагента

Гепарин – це ендогенна сполука, яка утворюється в організмі людини і ссавців. Вперше гепарин виділили у 1916 році з печінки (Hepar), звідки і виникла назва. Згодом ця сполука була виявлена в легенях, слизистій оболонці кишківника, м'язах та інших органах. Гепарин зменшує агресію тромбоцитів, підвищує судинну проникність, стимулює кровообіг, має спазмолітичну дію. Застосовують його для профілактики і терапії різних тромбоемболічних захворювань, при лабораторних дослідженнях для запобігання зворотання крові. Існують препарати, в яких гепарин є складовою: гепаринова мазь, фраксипарин, ендоксапарин натрію та інші. Всі ці препарати є антикоагулянтами.

За структурою гепарин неоднорідний і є сумішшю фракцій глікозаміногліканів, які складаються із залишків D-глюкозаміну і D-глюкуронової кислоти з різною довжиною полімерного ланцюга із різною молекулярною масою, яка коливається в діапазоні від 3000 до 40000 [6].

Аналіз формули і дослідження показують, що частина сульфатних груп етерифікуються гідроксилами, проте частина їх зв'язана з аміногрупами глюкозамінних залишків у вигляді сульфататних груп  $\text{NH}_2\text{SO}_3\text{H}$  [7].

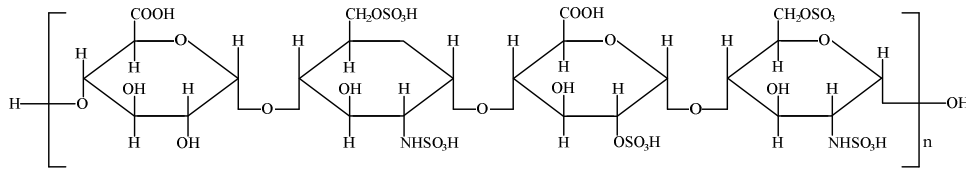


Рисунок 2 – Хімічна формула гепарину

Якщо коефіцієнт поверхневого натягу окремих чистих рідин помітно відрізняється, як наприклад, в сумішах типу спирт-вода, то додавання до води невеликої кількості спирту веде до значного зменшення коефіцієнта поверхневого натягу суміші в цілому [8, с. 23–24].

Аналіз опрацьованої літератури дозволив провести дослідження по зменшенню коефіцієнта поверхневого натягу, коефіцієнта динамічної в'язкості, густини для розчинів екстрагентів з використанням в якості ПАР спиртів із дещо більшою молекулярною масою. Використання таких речовин в якості ПАР базується на відомому правилі Траубе-Дюкло [9]. Нами раніше було запропоновано додавати у промисловий розчин такі спирти [10]:

- пропанол  $\text{CH}_3\text{-CH}_2\text{-CH}_2\text{-OH}$ ;
- бутанол  $\text{CH}_3\text{-(CH}_2\text{)}_3\text{-OH}$ ;
- пропанол+бутанол в рівних масових співвідношеннях.

У табл. 1 показані зміни коефіцієнта поверхневого натягу промислового розчину екстрагента при додаванні різних масових часток запропонованих спиртів. Ці дослідження були проведені поширеним і досить точним методом вимірювання коефіцієнта поверхневого натягу на границі рідина–повітря, рідина–рідина, тобто методом зважування краплі [8 с. 22–23]. Величину коефіцієнта поверхневого натягу розраховували за формулою:  $\sigma = \frac{Q}{2\pi r}$ , де Q – маса краплі, r – радіус піпетки.

Коефіцієнт динамічної в'язкості у промисловому і запропонованому нами розчинах визначали експериментально за допомогою капілярного віскозиметра (прилад Арреніуса).

Коефіцієнт динамічної в'язкості розраховували за формулою:  $\mu = \left( \frac{\pi r g d^4 \tau}{128 V I} \right) \times \left( 1 + \frac{h}{2} \right)$ .

Таблиця 1 – Зміна коефіцієнта поверхневого натягу екстрагента при застосуванні в якості ПАР деяких одноатомних спиртів

№	Кількість доданої ПАР, мл	Коефіцієнт поверхневого натягу $\sigma$ , Н/м		
		пропанол	бутанол	бутанол+пропанол
1	0,1	0,01145	0,00815	0,00900
2	0,2	0,09763	0,00706	0,01075
3	0,3	0,00969	0,00739	0,01088
4	0,4	0,00858	0,00672	0,00646
5	0,5	0,00788	0,00516	0,00575
6	0,6	0,00786	0,01021	0,00677
7	0,7	0,00787	0,00994	0,00892
8	0,8	0,00796	0,01042	0,00935
9	0,9	0,00799	0,01028	0,00963

Проаналізувавши табл. 1 бачимо, що мінімум коефіцієнта поверхневого натягу спостерігається при застосуванні в якості ПАР бутанолу в кількості 0,5 мл на 10 мл розчину екстрагента.

Основні фізичні характеристики промислового розчину (5 %-ний розчин солі у воді) і запропонованого нами з додаванням ПАР є такими:

Характеристики	Промисловий розчин	Запропонований розчин
Густина сировини	$\rho_{\text{ч}} = 664 \text{ кг/м}^3$	$\rho_{\text{ч}} = 664 \text{ кг/м}^3$
Густина розчину (екстрагента)	$\rho_{\text{с}} = 1039 \text{ кг/м}^3$	$\rho_{\text{с}} = 1030 \text{ кг/м}^3$
Коефіцієнт поверхневого натягу	$\sigma = 0,01150 \text{ Н/м}$	$\sigma = 0,00516 \text{ Н/м}$
Коефіцієнт динамічної в'язкості	$\mu = 0,0105 \text{ Па} \cdot \text{с}$	$\mu = 0,00025 \text{ Па} \cdot \text{с}$
Коефіцієнт форми частинки	$\Psi = 0,58$	$\Psi = 0,58$
Гідрофільність частинки	$\cos\theta = 0,88$	$\cos\theta = 0,98$



Середні товщини приповерхневого ламінарного шару із застосуванням промислового і запропонованого нами розчинів розраховували за методикою [10] для частинок із середнім діаметром  $d_c \approx 1$  мм. Середня товщина приповерхневого шару при екстрагуванні промисловим розчином:

$$1.1. \text{ Критерій Архімеда: } Ar = \frac{g \times d^3 (\rho_c - \rho_q) \rho_c}{\mu^2} = \frac{9,8 \times (1 \times 10^{-3})^3 (1039 - 664) 1039}{0,0105^2} = 3463.$$

$$1.2. \text{ Фактор роздільної здатності при виробництві гепарину: } K_{\mu} = \frac{\omega^2 \times D}{2 \times g} = 0,1836.$$

$$1.3. \text{ Модифікований критерій Архімеда: } Ar_m = Ar \times K_{\mu} = 635,8.$$

1.4. Коефіцієнт турбулізації приповерхневого шару:

$$K_{r(n)}^{\mu} = \frac{0,152(\psi \times Ar_m)^{0,715}}{2} = \frac{0,152(0,58 \times 635,8)^{0,715}}{2} = 5,2.$$

1.5. Середня товщина приповерхневого ламінарного шару:

$$\delta = \frac{\sqrt{\frac{9,42 \times \cos \theta \times \sigma}{g(\rho_c - \rho_q)}}}{K_{r(n)}^{\mu}} = \frac{\sqrt{\frac{9,42 \times 0,88 \times 0,01150}{9,8(1039 - 664)}}}{5,2} = 9,7 \times 10^{-3} \text{ м.}$$

Середнє значення товщини приповерхневого Л шару при використанні в якості екстрагента запропонованого нами розчину:

$$2.1. \text{ Значення критерію Архімеда: } Ar = \frac{9,8 \times (1 \times 10^{-3})^3 (1030 - 664) \times 1030}{0,00025^2} = 59110.$$

2.2. Фактор роздільної здатності екстрактора при виробництві гепарину по пункту 1.2:

2.3. Модифікований критерій Архімеда знаходимо по пункту 1.3:  $Ar_m = 10852$

2.4. Коефіцієнт турбулізації приповерхневого Л шару по пункту 1.4:  $K_{r(n)}^{\mu} = 39,54$

2.5. Середня товщина приповерхневого Л шару:

$$\delta = \frac{\sqrt{\frac{9,42 \times 0,88 \times 0,00516}{9,8(1030 - 664)}}}{39,54} = 0,87 \times 10^{-3} \text{ м.}$$

Порівнявши товщини приповерхневих Л шарів маємо:

$$\frac{\delta_6}{\delta_3} = \frac{9,7}{0,87} \approx 11 \text{ разів кращі екстрагуючі властивості.}$$

Застосування бутанолу в якості ПАР у промисловому розчині дозволить інтенсифікувати виробництво гепарину.

Важливим кроком виробництва гепарину є екстрагування його субстанції з подрібненої сировини (легенів забійних тварин). Цей процес потребує досить великих енерговитрат, тому що екстрагування проводиться при постійному перемішуванні. Для зменшення потужності перемішувачів можна провести екстрагування в умовах псевдозрідженого шару [11].

Розглянувши цей процес детальніше із врахуванням фізико-хімічних властивостей розчинника і сировини, а також гідродинамічних можливостей ємнісної апаратури [12], було запропоновано проводити процес в режимі псевдозрідження. Переваги запропонованого методу пояснюють тим, що в режимі псевдозрідження частинки легенів перебувають у невагомому стані і доступ екстрагента до них є кращим.

Для проведення екстрагування даним способом в екстракторі, в тому місці, де циліндрична частина екстрактора переходить в конічну, було закріплено решітку з отворами – 1мм, а розчин екстрагенту подавали з помпи під решітку в нижню частину екстрактора з робочим тиском  $p_p = \Delta p + \rho \times g \times h$ , де  $\Delta p$  – спад напору екстрактора при проходженні через псевдозріджений шар, Па;  $\rho \times g \times h$  – тиск стовпа суміші висотою  $h$ , густиною  $\rho$ ;  $g$  – прискорення вільного падіння.

Процес екстрагування при перемішуванні (пункти 1–3 аналогічні до попередніх).

1. Критерій Архімеда за формулою 1:  $Ar = 3463$

2. Фактор роздільної здатності екстрактора при виробництві гепарину за формулою 2:  $K_{\mu} = 0,1836$

3. Модифікований критерій Архімеда за формулою 3:  $Ar_m = 10852$

4. Модифікований критерій Рейнольдса при перемішуванні:

$$Re_m = \frac{\omega \times D^2 \times S \times \rho}{\mu} = \frac{3 \times 0,4^2 \times 1039}{0,00105} = 474971.$$

5. Критерій Ейлера при перемішуванні визначаємо з графіків залежності для мішалки [13]:  
 $Eu_m = \frac{N_T}{\rho_p \times \omega^3 \times D^5} \approx 0,7$ , де  $Eu_m$  – критерій Ейлера при перемішуванні,  $N_T$  – потужність, споживана мішалкою, Вт [13];  $N_T = Eu_m \times \rho_p \times \omega^3 \times D^5 = 0,7 \times 1039 \times 3^3 \times 0,4^5 = 201$  Вт,  $\omega$  – кутова швидкість обертання мішалки  $c^{-1}$  [12, с. 293-295].

Розрахуємо технологічний процес при створенні псевдозрідженого стану подрібнених легенів забійних тварин згідно із запропонованим способом:

1. Спад напору у псевдозрідженому шарі:  $\Delta P = g(\rho_T - \rho_p) \times (l - \varepsilon)$  [9], де  $g$  – прискорення вільного падіння,  $m/c^2$ ,  $\rho_T$ ,  $\rho_p$  – густина твердих частинок сировини і рідини відповідно  $kg/m^2$ ,  $\varepsilon$  – частка пустот у псевдозрідженому шарі,  $l$  – висота шару в стані псевдо зрідження при заданому значенні  $\varepsilon$ , м.

Для ефективної дифузії у псевдозрідженому шарі при значенні критерію Архімеда  $Ar = 3463$ ;  $\varepsilon \approx 0,7$  (по пункту 1)  $\Delta P = 9,8 \times (1039 - 664) \times (1 - 0,7) \times 0,4 = 441$  Па

2. Середня густина подрібнених легенів і розчину

$$\rho_c = \frac{100}{\frac{x_T}{\rho_T} + \frac{100 - x_T}{\rho_p}} = \frac{100}{\frac{50}{664} + \frac{100 - 50}{1039}} = 813 \text{ кг/м}^3$$

3. Робочий тиск подачі розчину в екстрактор:  $P_p = \Delta P + \rho_p g h = 6441 + 373 = 6814$  Па

4. Площа дзеркала суміші в екстракторі:  $S = \frac{\pi \times D_1^2}{4} = \frac{3,14 \times 1,2^2}{4} = 1,13 \text{ м}^2$ ,  $D_1$  – діаметр днища екстрактора, м [1, с. 113–116].

5. Сила тиску подачі розчину в екстрактор:  $F = S \times P_p = 1,13 \times 6814 = 7699$  Н

6. Робоче значення критерію Рейнольдса в екстракторі [13]:

$$Re_p = \frac{Ar \times \varepsilon^{4,75}}{18 + 0,6 \sqrt{Ar \times \varepsilon^{4,75}}} = \frac{3463 \times 0,7^{4,75}}{18 + 0,6 \sqrt{3463 \times 0,7^{4,75}}} = 2,33$$

7. Швидкість подачі розчинника:  $V = \frac{Re_p \times \mu}{d \times P_p} = \frac{2,33 \times 0,00105}{1 \times 10^{-3} \times 1039} = 0,0203$  м/с

8. Споживана потужність екстрактора:  $N_T = FV = 7699 \cdot 0,023 = 177$  Вт

Порівнявши, споживану потужність екстрактора при використанні мішалки  $N_T$  (в пункті 5) і  $N_T$  споживану потужність при проведенні екстрагування у псевдозрідженому стані (в пункті 8) маємо:  $N_T(\text{пер})/N_T(\text{псев}) = 201/177 = 1,13$ . Як бачимо це кращий результат на користь способу екстрагування гепарину в умовах псевдозрідженого стану.

Екстрагування в умовах псевдозрідженого шару можна забезпечити при використанні відцентрового екстрактора [4]. Важливим параметром при застосуванні цього апарату є кутова швидкість обертання мацерацийного бака екстрактора. В даному випадку це параметр оптимізації.

Розрахуємо оптимальну кутову швидкість обертання барабана відцентрового екстрактора при використанні промислового і запропонованого нами розчинів за методикою [14].

1. Критерій оптимізації при відцентровому екстрагуванні:

$$B_{ц} = 3,076 \sqrt{\frac{(\sigma \times \cos \theta)^3 \times \rho_c^2}{\mu^4 \omega^2 r(\rho_c - \rho_s)}} = 3,076 \sqrt{\frac{(0,01150 \times 0,77)^3 \times 1039^2}{0,00105^4 \omega^2 \cdot 0,2(1039 - 664)}} = \frac{137}{\omega^{0,33}}$$

2. Оптимальне значення критерію Рейнольдса:  $Re_{\text{опт}} = 2B_{ц} = \frac{275}{\omega^{0,33}}$

3. Модифікований критерій Архімеда:

$$A_{\text{rm}} = \frac{\omega^2 \times r \times d^3 (\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{с}}) \times \rho_{\text{с}}}{\mu^2} = \frac{\omega^2 \times 0,2 \times (10^{-3})^3 (1039 - 664) \times 1039}{0,00105^2} = 7,06\omega^2$$

4. Робоче значення критерію Рейнольдса:

$$Re_n = 0,152(\psi A_{\text{rm}})^{0,715} = 0,152(0,58 \times 7,06\omega^2)^{0,715} = 4,16\omega^{1,43}$$

5. Оптимальна кутова швидкість обертання барабана відцентрового екстрактора:

$$4,16\omega^{1,43} = \frac{275}{\omega^{0,33}}, \omega = 10,8\text{с}^{-1}$$

Оптимальна кутова швидкість обертання барабана відцентрового екстрактора із застосуванням запропонованого нами розчину з додаванням ПАР.

1. Критерій оптимізації при відцентровому екстрагуванні:

$$B_{\text{ц}} = 3,07 \sqrt[6]{\frac{(\sigma \times \cos\theta)^3 \times \rho_{\text{с}}^2}{\mu^4 \omega^2 r (\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{с}})}} = 3,07 \sqrt[6]{\frac{(0,0561 \times 0,88)^3 \times 1030^2}{0,00025^4 \omega^2 \times 0,2(1030 - 664)}} = \frac{256}{\omega^{0,33}}$$

2. Оптимальне значення критерію Рейнольдса:  $Re_{\text{опт}} = 2B_{\text{ц}} = \frac{512}{\omega^{0,33}}$

3. Модифікований критерій Архімеда:

$$A_{\text{rm}} = \frac{\omega^2 \times r \times d^3 (\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{с}}) \times \rho_{\text{с}}}{\mu^2} = \frac{\omega^2 \times 0,2 \times (10^{-3})^3 (1030 - 664) \times 664}{0,00025^2} = 1206\omega^2$$

4. Робоче значення критерію Рейнольдса для турбулентного (Т) режиму:  $Re_n = 0,152(\psi A_{\text{rm}})^{0,715} = 0,152(0,58 \times 1206\omega^2)^{0,715} = 16,76\omega^{1,43}$

5. Оптимальна кутова швидкість обертання барабана відцентрового екстрактора:

$$16,76\omega^{1,43} = \frac{512}{\omega^{0,33}}, \omega = 7,05\text{с}^{-1}$$

Порівняємо маси екстрактів, які виходять із подрібненої сировини при використанні базового та запропонованого екстрагентів за раніше виведеною формулою [14]. Робочі значення критеріїв Рейнольдса знайдемо за формулою викладеною вище:  $Re_6 = 4,16 \times \omega^{1,43}$ ,  $4,16 \times 10,8^{1,43} = 124$ ,  $Re_3 = 16,76 \times \omega^{1,43} = 16,76 \times 7,05^{1,43} = 273$

$$\frac{M_3}{M_6} = \frac{Re_3}{Re_6} \left( \frac{Re_3}{Re_6} \times 0,66 \right)^{0,66} = \frac{273}{124} \left( \frac{273}{124} \times 0,66 \right)^{0,66} \approx 2,79 \text{ рази.}$$

Як бачимо за розрахунком, екстрагуючі властивості кращі у 2,79 рази на користь запропонованого способу.

Проведені нами дослідження і наведені вище розрахунки підтверджують, що застосування у промисловому розчині ПАР при виробництві гепарину інтенсифікує технологічний процес.

### **Висновки**

1. Для виробництва гепарину нами запропоновано додавати в базовий розчин екстрагенту в якості ПАР бутанол – на 1 л промислового розчину (5 % розчин кухонної солі) додатково вносимо 5 мл 86 % бутанолу.

2. При застосуванні цього розчину зменшується середня товщина приповерхневого ламінарного шару навколо частинки подрібненої сировини, а також оптимальна кутова швидкість обертання барабана відцентрового екстрактора, що значною мірою інтенсифікує технологічний процес та робить його більш енергоефективним.

### **Література**

1. Гуров В.А. Справочник по производству органолептических/ Гуров В.А., Иноземцева М.А., Земеховский А.В. – М: Пищевая промышленность, 1970. – 209 с.
2. Білонога Ю.Л. Про техніко-економічну доцільність використання псевдо зрідженого шару при виробництві інсуліну/ Білонога Ю.Л., Ціж Б.Р., Білонога Д.М., Варивода Ю.Ю. //Науковий вісник ЛАВМ імені С.З. Гжицького. – 2002. –Т.4, №1. – С.156–159.

3. Білонога Ю.Л. Про доцільність розгляду гідромеханічних процесів з урахуванням сили припове-рхневого натягу на границі контакту тверде тіло-рідина /Ю.Л. Білонога // Інтегровані технології та енер-гозбереження. – 2006. – №2. – С. 56–64.
4. Білонога Ю.Л. Оптимізація параметрів екстрагування у псевдозрідженому шарі при виробництві органопрепаратів /Кравців Р.Й // Наукові праці ОНАХТ. – 2006. – №28. – С.174–181.
5. Аксельруд Г.А. Экстрагирование. Система твердое тело-жидкость. /Г. Аксельруд, В.Я. Лысян-ский. – Ленинградское отделение: Химия, 1974. – 465 с.
6. Машковский М.Д. Лекарственные средства. – Т. 1. – Москва: Новая волна, Издатель Дидов С.Д., – 2001. – 501 с.
7. Степаненко Б.Н. Химия и биохимия углеродов (полисахаридов) /Степаненко Б.Н. – Москва: Вы-сшая школа, 1978. – 205 с.
8. Адамсон А. Физическая химия поверхностей. – М. : Мир. –1979. –568с.
9. Липатов С.М. Физико-химия коллоидов / Липатов С.М. – Государственное научно-техническое издательство химической литературы, 1948. – 298 с.
10. Білонога Ю.Л. Спосіб інтенсифікації процесу екстрагування хонсуриду із застосуванням пове-рхнево-активних речовин / Ю.Л. Білонога, Б.Р. Ціж, Ю.Ю. Варивода,У.Р. Драчук // Науковий вісник ЛНУВМ та БТ імені С.З. Гжицького. – 2008. – Т.10. №2. (37). – С.14–18.
11. Білонога Ю.Л. Деякі аспекти енергозбереження при виробництві інсуліну /Білонога Ю.Л., Бі-лонога Д.М., Варивода Ю.Ю. // Науковий вісник ЛДАВМ імені С.З. Гжицького. – 2001. – Т.3. №4. Ви-пуск 3. – С. 217–220
12. Кавецкий Г.Д. Процессы и аппараты пищевых производств / Г. Кавецкий, А.Королев. – М.: Аг-ропромиздат. – 1991. – 431с.
13. Боруля В.А. Ганжа В.Л., Ковенский Н.Н. Гидродинамика и теплообмен в псевдооживленном слое под давлением. / Боруля В.А., Ганжа В.Л., Ковенский Н.Н. –Минск: – Наука и техника, –1982.– 203 с.
14. Білонога Ю.Л. Інтенсифікація та оптимізація тепломасообмінних процесів при виробництві ор-ганопрепаратів і переробці вторинної сировини м'ясокомбінатів: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня доктор техн. наук: спец. 05.18.12 .»Процеси та обладнання харчових, мікробіологічних та фармацевтич-них виробництв» / Ю.Л. Білонога. – Одеса, 2006. – 36, [14–18]с.

Bibliography (transliterated)

1. Gurov V.A. Spravochnik po proizvodstvu organopreparatov Gurov V.A., Inozemceva M.A., Ze-mihovskij A.V. – М: Pishhevaja promyshlennost', 1970. – 209 p.
2. Bilonoga Ju.L. Pro tehniko-ekonomichnu docil'nist' vikoristannja psevdо zridzhenogo sharu pri virobniцtvi insulinu Bilonoga Ju.L., Cizh B.R., Bilonoga D.M., Varivoda Ju.Ju. Naukovij visnik LAVM imeni S.Z. Gzhic'kogo. – 2002. –Т.4, #1. – p.156–159.
3. Bilonoga Ju.L. Pro docil'nist' rozgljadu gidromehanichnih procesiv z urahuvannjam sili pripove-rhnevoг natjagu na granici kontaktu tvrde tilo-ridina /Ju.L. Bilonoga Integrovani tehnologії ta ener-gozberezhenija. – 2006. – #2. – p. 56–64.
4. Bilonoga Ju.L. Optimizacija parametriv ekstraguvannja u psevdозridzhenomu shari pri virobniцtvi organopreparativ /Kravciv R.J Naukovi pracі ONAHT. – 2006. – #28. – p.174–181.
5. Aksel'rud G.A. Jekstragirovanie. Sistema tvrdoe telo-zhidkost'. G. Aksel'rud, V.Ja. Lysjan-skij. – Leningradskoe otdelenie: Himija, 1974. – 465 p.
6. Mashkovskij M.D. Lekarstvennye sredstva. – Т. 1. – Moskva: Novaja volna, Izdatel' Didov S.D., – 2001. – 501 p.
7. Stepanenko B.N. Himija i biohimija uglerodov (polisaharidov) Stepanenko B.N. – Moskva: Vy-sshaja shkola, 1978. – 205 p.
8. Adamson A. Fizicheskaja himija poverhnostej. – М. : Mir. –1979. –568s.
9. Lipatov S.M. Fiziko-himija kolloidov Lipatov S.M. – Gosudarstvennoe nauchno-tehnicheskoe izdatel'stvo himicheskоj literatury, 1948. – 298 p.
10. Bilonoga Ju.L. Sposib intensifikacії procesu ekstraguvannja honsuridu iz zastosuvannjam pove-rhnevo-aktivnih rechovin Ju.L. Bilonoga, B.R. Cizh, Ju.Ju. Varivoda,U.R. Drachuk Naukovij visnik LNUVM ta BT imeni S.Z. Gzhic'kogo. – 2008. – Т.10. #2. (37). – p.14–18.
11. Bilonoga Ju.L. Dejaki aspekti energozberezhenija pri virobniцtvi insulinu Bilonoga Ju.L., Bi-lonoga D.M., Varivoda Ju.Ju. Naukovij visnik LДАVМ imeni S.Z. Gzhic'kogo. – 2001. – Т.3. #4. Vipusk 3. – p. 217–220
12. Kaveckij G.D. Processy i apparaty pishhevych proizvodstv / G. Kaveckij, A.Korolev. – М.: Аг-ропромиздат. – 1991. – 431s.

13. Borulja V.A. Ganzha V.L., Kovenskyj N.N. Hidrodinamika i teploobmen v psevdoozhizhenom sloe pod davleniem. Borulja V.A., Ganzha V.L., Kovenskij N.N. –Minsk: – Nauka i tehnika, –1982.– 203 p.

14. Bilonoga Ju.L. Intensifikacija ta optimizacija teplomasoobminnih procesiv pri virobnictvi organopreparativ i pererobci vtorinnoi sirovini m'jasokombinativ: avtoref. dis. na zdobuttja nauk. stupenja doktor tehn. nauk: spec. 05.18.12 .»Procesi ta obladnannja harchovih, mikrobiologichnih ta farmacevtich-nih virobnictv» Ju.L. Bilonoga. – Odesa, 2006. – 36, [14–18]p.

УДК 664.661.12.021.3

Билонога Ю.Л., Драчук У.Р.

**ПУТИ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПОВЕРХНОСТНО-АКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ (ПАВ) ПРИ ЭКСТРАГИРОВАНИИ ГЕПАРИНА В ПСЕВДООЖИЖЕННОМ СЛОЕ**

При производстве гепарина предложено проводить процесс непосредственного экстрагирования в псевдоожигеном слое. Интенсифицировать этот технологический процесс можно введением в промышленный раствор ПАВ, 5 мл 86 % бутанола на 1 л раствора, что делает его более рентабельным. Использование предложенного раствора уменьшает среднюю толщину приповерхностного ламинарного слоя вокруг измельченной частицы сырья, а также дает возможность уменьшить оптимальную угловую скорость вращения барабана центробежного экстрактора. Уменьшение этих параметров способствует интенсификации технологического процесса, а также повышает его энергоэффективность.

Bilonoha Y.L., Drachuk U.R

**THE WAYS OF ENERGY SAVING WITH THE USING OF SURFACE-ACTIVE SUBSTANCES (SAS) DURING EXTRACTION OF GEPARIN IN PSEUDOLIQUIFIED LAYER**

During production of geparin it was proposed to carry out the process of indirect extraction in pseudoli-quefied layer. To intensify technological process and make it profitable one should add to the solution of SAS 5ml of 56% alcohol butanol per 1 l of solution. Usage of such solution makes the surface laminar layer around little parts of material not so thick and also gives possibility to reduce the optimum speed of cylinder rotation of centripetal extractor. Reduction of these parameters gives a lot to the intensification of technological process and also increases its power effectiveness.

**К ВОПРОСУ ОБ ОЦЕНКЕ ВЛИЯНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК  
ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ НА ТЕПЛООТДАЧУ**

**Актуальность проблемы.** К теплофизическим характеристикам теплоносителя, которые оказывают влияние на теплоотдачу, следует отнести плотность, вязкость, теплоемкость и теплопроводность, а также с учетом различных условий эксплуатации теплообменного оборудования к перечисленному следует добавить запыленность, наличие капель влаги, частиц льда или снега.

Первые четыре величины учитывают в виде критерия Прандтля, и таким образом число Прандтля является существенной характеристикой теплоносителя с точки зрения особенностей процесса конвективного теплопереноса. В зависимости от его численного значения теплоносители делят на три группы:  $Pr < 1$ ,  $Pr \approx 1$ ,  $Pr > 1$ . К первой группе относятся жидкометаллические теплоносители. Ко вторым – газы при невысоких давлениях и жидкости при высоких температурах. Для них  $0.6 < Pr < 1.0$ . Третью группу образуют капельные жидкости: вода, органические и неорганические жидкости. Некоторые жидкости – вязкие масла, глицерин – при низких температурах имеют числа Прандтля, достигающие нескольких тысяч. Это объясняет главным образом их большой вязкостью, в особенности при низких температурах.

Число Прандтля является важным параметром, характеризующим тепловой пограничный слой, причем как при вынужденной, так и при свободной конвекции. Согласно определению оно представляет собой отношение двух величин, характеризующих свойства, связанные с переносом импульса (вязкость) и переносом теплоты (теплопроводность). Если способность вещества к переносу импульса особенно велика, то влияние стенки, уменьшающее импульс – условия прилипания, также велико, следовательно, это влияние проникает далеко внутрь течения. Иными словами, толщина динамического пограничного слоя получается сравнительно большой. Аналогичное имеет место и для теплового пограничного слоя. Таким образом, при вынужденных конвективных течениях число Прандтля является непосредственной мерой отношения толщин динамического и теплового пограничных слоев.

К настоящему времени проведены многочисленные исследования трения и теплоотдачи для турбулентного движения жидкости в каналах различного профиля и поперечного сечения. Однако лишь немногие работы посвящены исследованиям при хорошо сформулированных условиях.

Большинство экспериментальных данных являются результатами применения методики, разработанной Иглом и Фергюсоном [1] еще более 80-ти лет назад, которая дает экспериментальные значения теплообмена при нулевом тепловом потоке, что физически означает постоянство свойств теплоносителя. Такое допущение часто принимается в теоретических исследованиях. Следующим шагом были работы Спэрроу и Хартнета, выполненные в 50–60-х годах для диапазона числа Прандтля 0.7...100 при турбулентном движении на основе модели с наперед заданным соотношением для коэффициента турбулентной диффузии. В этих работах свойства теплоносителя также принимались постоянными. Далее в работах Алена и Эккерта [2] было показано, что на участке со стабилизировавшимся пограничным слоем при  $Pr=8$  число  $Nu$  изменялось пропорционально числу Рейнольдса, показатель степени которого систематически возрастал 0.84...0.87, в противоположность принятому значению 0.8. Кроме того, отношение числа  $St$  к коэффициенту трения было приблизительно на 30% выше величины  $Pr^{-2/3}$ , причем оно зависело от  $Re$ .

Таким образом, в инженерных расчетах целесообразно устанавливать степень точности вычисляемого по критериальному уравнению коэффициента теплоотдачи в зависимости от теплофизических свойств теплоносителя, которые определяются тепловыми условиями проведения процесса.

Приведенные рассуждения справедливы и для ламинарного пограничного слоя, однако турбулентные пульсации будут разрушать динамический пограничный слой, о чем говорит более заполненный профиль скорости при турбулентном движении.

Ввиду отсутствия возможности проведения большого количества серий экспериментов для выявления влияния числа  $Pr$  на теплоотдачу даже для одной формы каналов было признано целесообразным обобщить опубликованные данные по экспериментальному исследованию теплоотдачи в круглых каналах, полученные Себеси, Кадером и Ягломом, которые проводились в диапазоне чисел Рейнольдса  $10^4...10^5$  и диапазоне чисел Прандтля 0.02...14.3. Отобранные результаты экспериментальных данных обрабатывались с применением критериально-структурного метода [3], в результате чего было получено критериальное уравнение

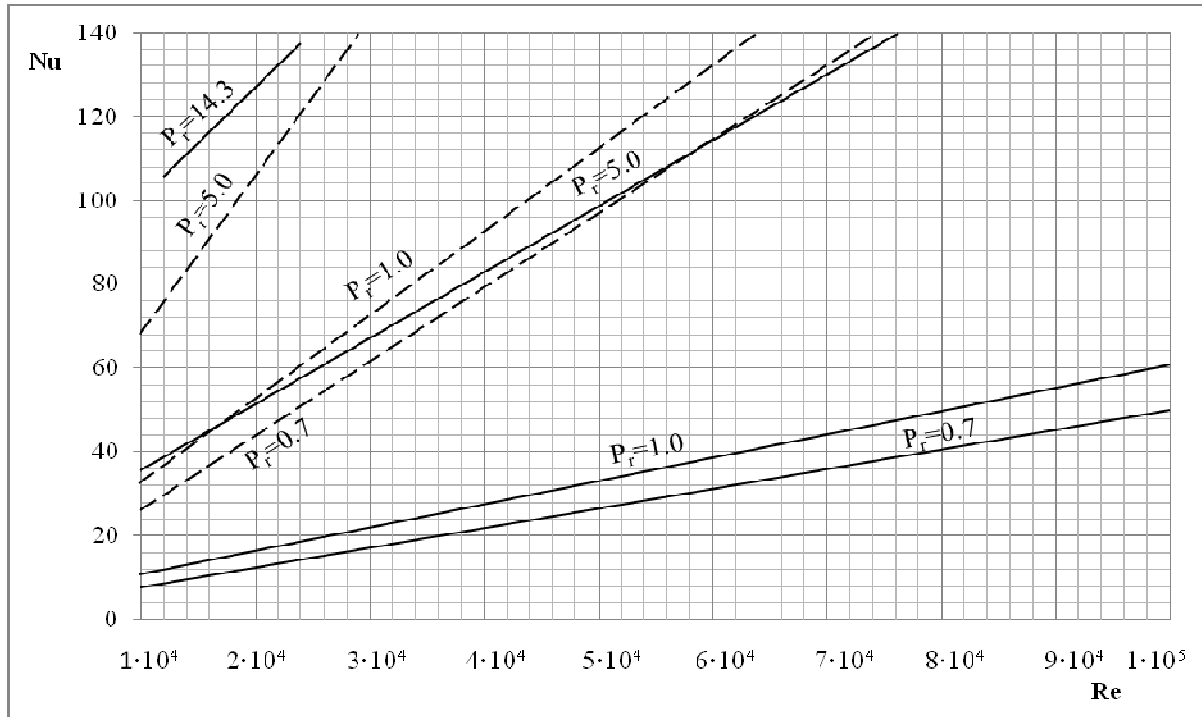
$$Nu=0.018Re^{0.707}Pr^{0.647}, \tag{1}$$

которое отличается от известного и широкого применения уравнения [4]

$$Nu=0.018Re^{0.8}Pr^{0.33} \quad (2)$$

меньшим показателем степени при критерии Рейнольдса, и большим при критерии Прандтля.

Графики функций (1) и (2) от критерия Рейнольдса для различных значений критерия Прандтля представлены на рисунке.



Рисунок

Физическая достоверность полученного уравнения (1) подтверждается проверкой по соотношению толщины теплового и динамического пограничных слоев. Поскольку, как было показано[4]

$$\frac{\delta_T}{\delta_D} \approx \frac{1}{Pr}, \quad (3)$$

то, подставляя в (3) соответствующие значения из (2) и (1) в обоих случаях для воздуха, было получено, что

$$\frac{\delta_T}{\delta_D} \approx 0,5. \quad (4)$$

Практически уравнение (1) показывает, что при Re=idem критерий Nu в большей степени зависит от критерия Прандтля, чем по уравнению (2). Как видно по рисунку выражение (2) дает завышенные значения теплоотдачи при Pr≤1, что будет приводить к отклонению значения температур теплоносителей от ожидаемой. Как правило, для получения требуемой температуры увеличивают поверхность теплообмена, вводя так называемый коэффициент запаса. Здесь следует подчеркнуть, что значение критерия Прандтля 0.7 характерно в широком диапазоне температур для воздуха, углекислого газа, кислорода, водяного пара, азота, гелия, водорода.

С другой стороны данные теплофизических свойств например воды, трансформаторного масла таковы, что в диапазоне температур от 0 до 100°С критерий Прандтля изменяется 13.7...1.75. Поэтому выражение (2) для этих и подобных жидкостей дает результаты с удовлетворительной точностью в интервале температур от 20 до 60°С. В заключение следует отметить, что для трансформаторного масла в

указанном диапазоне температур критерий Прандтля изменяется  $471 \cdot 10^4 \dots 0.84 \cdot 10^2$  и поэтому применение выражения (2) без специальной поправки приводит к существенным ошибкам в тепловых расчетах.

Критически оценивая полученное критериальное уравнение (1), отметим, что оно может применяться для теплоносителей в диапазоне критерия Рейнольдса  $10^4 \dots 10^5$  и при  $Pr \neq 1$  дает удовлетворительные по точности результаты, ошибка которых не превышает 3.5% по сравнению с данными экспериментов перечисленных выше исследователей, что позволяет рекомендовать это уравнение для практических расчетов. Вместе с тем, использование этого выражения  $Pr \geq 20$  требует дополнительных исследований.

**Выводы.** Анализ выражения (1) позволяет сделать вывод о том, что при  $Pr \neq 1$  теплофизические свойства теплоносителя оказывают более существенное влияние на теплоотдачу, чем считалось до настоящего времени.

### Литература

1. A.Eagle, Ferguson, The coefficient of heat transfer from turbo to water. Proc.Inst. Mech. London. vol 2.1930.
2. Алєн, Эккєрт Измерение коэффициєнта трєния и теплоотдачи при турбулєнтном движении воды в трубе для постоянного теплового потока на стенке. Труды АОИМ №3, 1964
3. Аніпко О.Б. Критєриально-структурный метод для описания конвєктивной теплоотдачи. Зб. наук. прац. Сист. обробки інф. Х. ХВУ. 2000.
4. Себиси, Бредшоу Конвєктивный теплообмен. М. Мир. 1987. – 592с.

### Bibliography (transliterated)

1. A.Eagle, Ferguson, The coefficient of heat transfer from turbo to water. Proc.Inst. Mech. London. vol 2.1930.
2. Alen, Jekkert Izmerenie kojefficienta trenija i teplootdachi pri turbulentnom dvizhenii vody v trube dlja postojannogo teplovogo potoka na stenke. Trudy AOIM #3, 1964
3. Anipko O.B. Kriterial'no-strukturnyj metod dlja opisanija konvektivnoj teplootdachi. Zb. nauk. prac. Sist. obrobki inf. H. HVU. 2000.
4. Sebisi, Bredshou Konvektivnyj teploobmen. M. Mir. 1987. – 592p.

УДК 623.438.32

Аніпко О.Б., Клімов В.Ф., Магерамов Л.К.-А., Колбасов О.М.

### ДО ПИТАННЯ ПРО ОЦІНКУ ВПЛИВУ ТЕПЛОФІЗИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕПЛОНОСІЯ НА ТЕПЛОВІДДАЧУ

У статті наведені матеріали щодо оцінки теплофізичних характеристик теплоносія, які оцінюються за комплексними показниками чисел Прандтля та критерія Рейнольдса.

Anipko O.B., Klimov V.F., Mageramov L.K.-A., Kolbasov O.M.

### ON THE PROBLEM OF THERMOPHYSICAL CHARACTERISTICS INFLUENCE ESTIMATION ON HEAT TRANSFER.

The materials are presented relating to estimation of influence of fluid thermophysical on heat transfer with Prandtl and Reynolds numbers.



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

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ РАЗБОРНЫХ ПЛАСТИНЧАТЫХ ТЕПЛООБМЕННИКОВ

**Актуальность и постановка проблемы.** Пластинчатые теплообменные аппараты (ПТА) являются одним из наиболее эффективных типов теплообменного оборудования. Конструкции, принципы компоновки и методы проектирования этих аппаратов достаточно полно описаны в литературе [1–4]. В сравнении с традиционными кожухотрубными аппаратами, пластинчатые теплообменники компактны и требуют меньших затрат материалов для изготовления поверхности теплопередачи. ПТА имеют ряд преимуществ по сравнению с другими типами аппаратов, такие как высокий коэффициент теплопередачи, малые габариты, низкая стоимость, меньшая склонность к загрязнению, изменение поверхности теплопередачи в одном аппарате, удобство обслуживания, и, что особенно важно для энергосбережения, возможность работы с малым температурным сближением – вплоть до 1–2 °С.

Благодаря отличию в конструкции ПТА от традиционных кожухотрубных аппаратов, для их расчетов необходимы несколько другие методы проектирования. Разработка таких методов должна основываться на точных и достоверных математических моделях. Главной задачей при проектировании ПТА является минимизация стоимости теплообменника, зависящая от типоразмера аппарата и поверхности теплообмена (количества пластин), при максимальном удовлетворении проектных данных по мощности и допустимым потерям давления. Для выполнения этих требования существенным образом может меняться компоновка, в том числе увеличиваться число ходов, или в одном аппарате использоваться теплопередающие пластины различной гофрировки. Для реализации таких изменений при проектировании теплообменника в настоящей работе сформулирована проблема и предложена математическая реализация поставленной задачи.

### Математическое моделирование пластинчатого теплообменного аппарата

Разборный ПТА состоит из набора гофрированных пластин, расположенных между опорной и прижимной плитами, которые стянуты болтами [4]. Пластины разделены системой уплотняющих прокладок, которые организуют движение теплоносителей в каналах между пластинами. В многоходовом ПТА пластины сгруппированы таким образом, что они формируют группы параллельных каналов. Одна такая группа соответствует одному ходу, при этом поток проходит через соответствующие хода, как показано на рис.1. Температурные перепады в ходах различны и в разных группах каналов может иметь место прямоточное и противоточное движение теплоносителей.

Математическая модель ПТА основывается на следующих допущениях:

- процесс теплообмена стационарный;
- фазовый переход в каналах у теплоносителей отсутствует;
- число пластин в аппарате достаточно велико, чтобы в общем смешанном токе не учитывать различия в условиях теплопередачи на пластинах, ограничивающих ход теплоносителя;
- неравномерностью расхода теплоносителей в коллекторах по отдельным каналам пренебрегаем.
- каждая группа каналов соответствует одному ходу;
- потоки полностью смешиваются в соединительных частях коллекторов ПТА.

Принимая такие допущения. ПТА можно рассматривать как совокупность одноходовых блоков пластин. Условия для всех каналов в таких блоках идентичны. Компоновка с тремя ходами для горячего теплоносителя ( $X_1=3$ ) и двумя для холодного теплоносителя ( $X_2=2$ ) представлена на рис. 2. Площадь теплопередающей поверхности блока  $F_b = F/(X_1 X_2)$ , где  $F$  – общая площадь теплообмена ПТА. Изменение температуры горячего теплоносителя для каждого блока –  $\delta t_i$ ,  $i = 1, 2...6$ .

Общее количество блоков  $n_b = X_1 X_2$ , число единиц теплопереноса в блоке, рассчитанное для горячего потока равно

$$NTU_b = \frac{U_b F_b X_2}{G_1 c_1}, \quad (1)$$

где  $U_b$  – коэффициент теплопередачи в блоке, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $G_1$  – массовый расход горячего теплоносителя, кг/с;  $c_1$  – удельная теплоемкость горячего теплоносителя, Дж/(кг·К).

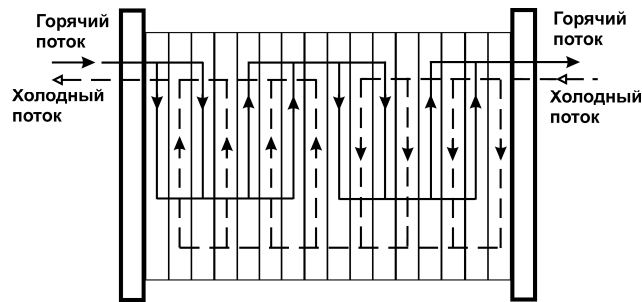


Рисунок 1 – Схема потоков теплоносителей в многоходовом ПТА

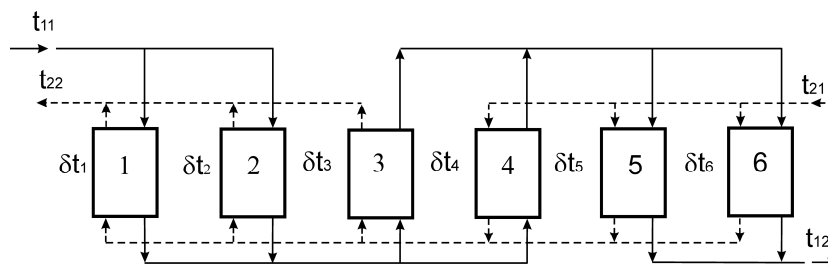


Рисунок 2 – Условная схема пластинчатого теплообменника в виде системы одноходовых блоков пластин ( $X_1=3, X_2=2$ )

Положим, что  $G_1c_1/X_2 \leq G_2c_2/X_1$ , тогда эффективность теплопередачи в блоке  $\varepsilon_b$  для случая противотока

$$\varepsilon_b = \frac{1 - \exp(NTU_b \cdot R_b - NTU_b)}{1 - R_b \cdot \exp(NTU_b \cdot R_b - NTU_b)}, \quad (2)$$

где  $R_b = G_1 \cdot c_1 \cdot X_1 / (G_2 \cdot c_2 \cdot X_2)$  – отношение для водяных эквивалентов потоков, протекающих через блок;  $G_2$  – массовый расход холодного теплоносителя, кг/с,  $c_2$  – удельная теплоемкость холодного теплоносителя, Дж/(кг·К). В случае, если  $R_b=1$ ,  $\varepsilon_b = NTU_b / (1 + NTU_b)$ .

Для прямоточного движения теплоносителей

$$\varepsilon_b = \frac{1 - \exp(-NTU_b \cdot R_b - NTU_b)}{1 + R_b}. \quad (3)$$

С другой стороны, эффективность теплопередачи в  $i$ -ом блоке равна

$$\varepsilon_{bi} = \delta t_{i1} / \Delta t_i, \quad (4)$$

где  $\delta t_{i1}$  – падение температуры теплоносителя в  $i$ -ом блоке;  $\Delta t_i$  – разность температур, поступающих в  $i$ -й блок теплоносителей.

Температурное изменение холодного потока

$$\delta t_{2i} = \delta t_{i1} \cdot R_b. \quad (5)$$

Приведенные соотношения справедливы и при  $G_1c_1 / X_2 > G_2c_2 / X_1$ . В этом случае меняется только физический смысл величин  $\varepsilon_b$  и  $NTU_b$  [3]. Таким образом, представленные соотношения можно рассматривать как математическую модель отдельного блока, которая описывает зависимость изменений температуры в блоке от характеризующих факторов блока  $F_b$  и  $U_b$ . Для каждого блока можно записать уравнение, связывающее изменение температуры в этом блоке от температурных изменений в других блоках ПТА.

Рассмотрим первый блок на рис. 2. Перепад температур для потоков, входящих в блок, можно вычислить путем вычитания среднего возрастания температуры холодного теплоносителя в блоках 4, 5 и 6 от начального перепада температуры  $\Delta$  потоков, поступающих в ПТА

$$\Delta t_1 = \Delta - (\delta t_4 \cdot R_b + \delta t_5 \cdot R_b + \delta t_6 \cdot R_b) / 3.$$

Подставив полученное соотношение в (4), после перегруппировки, получим

$$\delta t_1 + \delta t_4 \frac{\varepsilon_{b1}}{3} R_b + \delta t_5 \frac{\varepsilon_{b1}}{3} R_b + \delta t_6 \frac{\varepsilon_{b1}}{3} R_b = \varepsilon_{b1} \Delta. \quad (6)$$

Подобным образом можно сформировать аналогичные соотношения для каждого блока ПТА. В итоге, мы получим систему 6-ти линейных алгебраических уравнений с 6-ю неизвестными переменными  $\delta t_1, \delta t_2, \dots, \delta t_6$ .

Как показано в работе [5], подобная система может быть представлена в матричном виде для любого количества ходов

$$[Z][\delta t_i] = [\varepsilon_{bi}\Delta], \quad (7)$$

где  $[\delta t_i]$  – вектор-столбец падений температур в блоках;  $[\varepsilon_{bi}\Delta]$  – вектор-столбец правых частей системы;  $[Z]$  – матрица коэффициентов системы, элементами которой являются

$$z_{ij} = \begin{cases} \frac{\varepsilon_{bi}R_b}{2X_1} \left\{ 1 \cdot \text{sign} \left( j - \left( \text{int} \left[ \frac{i-1}{X_i} \right] + 1 \right) X_1 + 0.5 \right) + 1 \right\}, & \text{if } j > i \\ 1, & \text{if } i = j \\ \frac{\varepsilon_{bi}}{2X_2} \left\{ 1 \cdot \text{sign} \left( \text{int} \left[ \frac{i-1}{X_2} \right] X_2 - j + 0.5 \right) + 1 \right\}, & \text{if } j < i \end{cases}. \quad (8)$$

где  $i$  – номер ряда;  $j$  – номер столбца.

Решение системы линейных алгебраических уравнений (7) не вызывает трудностей, и общее изменение температур в ПТА по греющему и нагреваемому теплоносителю

$$\delta t_{\Sigma 1} = \sum_{i=1}^{X_1} \left( \frac{1}{X_1} \sum_{ii=1}^{X_2} \delta t_{(i-1)X_2+ii} \right); \quad \delta t_{\Sigma 2} = \frac{(G_1c_1)}{(G_2c_2)} \delta t_{\Sigma 1}. \quad (9)$$

Общая тепловая нагрузка теплообменника

$$Q = \delta t_{\Sigma 1} \cdot G_1 \cdot c_1, \quad (10)$$

Эти соотношения необходимо дополнить уравнениями для расчета общего коэффициента теплопередачи

$$U = \left( \frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} + \frac{\delta_w}{\lambda_w} + R_f \right)^{-1}, \quad (11)$$

где  $\alpha_1, \alpha_2$  – коэффициент теплоотдачи для горячего и холодного потоков соответственно, Вт/м<sup>2</sup>·К;  $\delta_w$  – толщина пластины, м;  $\lambda_w$  – коэффициент теплопроводности материала пластины, Вт/(м·К);  $R_f = R_{f1} + R_{f2}$  – термическое сопротивление тепловому потоку от загрязнения стенки пластины, м<sup>2</sup>·К/Вт.

Для пластинчатых теплообменников коэффициенты теплоотдачи обычно вычисляются по эмпирическим соотношениям

$$Nu = f(Re, Pr) = A \cdot Re^n Pr^{0,4} (\mu / \mu_w)^{0,14}, \quad (12)$$

где  $Nu, Re, Pr$  – числа Нуссельта, Рейнольда и Прандтля;  $\mu$  и  $\mu_w$  – динамическая вязкость при температурах потока и стенки пластины соответственно, сП;  $A, n$  – постоянные.

Потери давления в одном канале теплообменника

$$\Delta p = \zeta \cdot \frac{L_p}{d_e} \cdot \frac{\rho \cdot w^2}{2}, \quad (13)$$

где  $L_p$  – приведенная длина пластины (отношение площади пластины к ее ширине), м;  $d_e$  – эквивалентный диаметр канала, образованного пластинами, м,  $d_e \approx 2\delta$ ,  $\delta$  – высота гофрировки пластины, м;  $\rho$  – плотность, кг/м<sup>3</sup>;  $w$  – скорость теплоносителей в каналах, м/с;  $\zeta$  – коэффициент трения, который обычно определяется из эмпирического соотношения

$$\zeta = B / Re^m, \quad (14)$$

где  $B, m$  – постоянные.

Для многоходового теплообменника потери давления для одного хода умножаются на количество ходов  $X_{1,2}$ .

Пластины одного типа для теплообменных аппаратов обычно изготавливаются с разными углами наклона гофрировки, это позволяет создавать различные каналы при установке их в аппарат, например на рис. 3 представлены 3 типа каналов для двух видов пластин.

Пластины типа Н имеют больший угол наклона гофрировки (~ 60°). Они образуют Н - каналы с высоким коэффициентом теплопередачи и гидравлического сопротивления. Пластины типа Л имеют меньший угол (~ 30°) и образуют Л – каналы с меньшим значением коэффициента теплопередачи и гидравлического сопротивления. Совместное их использование образует МН или МЛ каналы с промежуточными характеристиками (рис. 3). Такой принцип конструирования позволяет изменять тепловые и гидравлические характеристики пакета пластин с точностью до одной пластины в пакете.

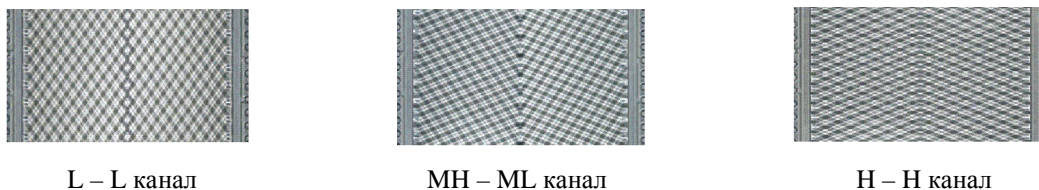


Рисунок 3 – Каналы, образованные комбинацией пластин с разным углом наклона гофрировки

В теплообменном аппарате обычно используются два вида каналов. Один с большим гидравлическим сопротивлением и теплоотдачей ( $x$ -канал), а другой с меньшими характеристиками ( $y$ -канал). Когда поток проходит по множеству таких каналов, то температурные изменения в различных каналах не одинаковы, но после смешивания в коллекторах происходит выравнивание температур. Эффективность теплопередачи блока пластин с различными каналами

$$\varepsilon_b = (g_x \cdot n_x \cdot \varepsilon_x + g_y \cdot n_y \cdot \varepsilon_y) / (g_x \cdot n_x + g_y \cdot n_y), \quad (15)$$

где  $n_x$  и  $n_y$  – количество  $x$  и  $y$  каналов в блоке пластин соответственно;  $g_{x,y} = w_{x,y} \cdot \rho \cdot f_{ch}$  – удельный массовый расход одного канала  $x$  или  $y$  типа, где  $f_{ch}$  – площадь поперечного сечения канала, м<sup>2</sup>. Эти уравнения должны удовлетворять равенству потерь давления  $\Delta p_x = \Delta p_y$  и материальному балансу

$$g_x \cdot n_x + g_y \cdot n_y = G_b, \quad (16)$$

где  $G_b$  – расход теплоносителя в блоке пластин.

Принципы комбинирования каналов разных типов в одном аппарате дают наилучшие результаты при симметричной организации ходов ( $X_1 = X_2$ ). Несимметричная компоновка, когда  $X_1 \neq X_2$ , используется в случае, когда все каналы одинаковы (любого из трех возможных видов). Если число каналов определено, то число пластин можно вычислить из соотношений

$$N_{pl} = \sum_{i=1}^{X_1} (n_{x1i} + n_{y1i}) + \sum_{j=1}^{X_2} (n_{x2j} + n_{y2j}) + 1. \quad (17)$$

Общая площадь теплопередачи аппарата (две крайние пластины не рассматриваются)

$$F_{PHE} = (N_{pl} - 2) \cdot F_{pl}, \quad (18)$$

где  $F_{pl}$  – площадь поверхности теплопередачи одной пластины, м<sup>2</sup>.

Вышеприведенные уравнения (1)–(18) описывают взаимосвязь между переменными, характеризующими теплообменник, и процессом теплопередачи в нем. Они представляют собой математическую модель ПТА, решение которой позволяет вычислить изменение давления и температуры потоков, поступающих в теплообменный аппарат (задача анализа).

Задача проектирования ПТА (синтеза) заключается в нахождении его характеристик (таких как тип пластин, количество ходов, количество пластин различной гофрировки), которые наилучшим образом удовлетворяют условиям реализации процесса теплообмена. Для этого рассматривается оптимальный расчет с определением перепада давления, как представлено в работе [6]. Целевой функцией является минимум общей поверхности теплоотдачи теплообменника. При этом должны выполняться условия удовлетворения заданной тепловой нагрузки  $Q^0$  и допустимым потерям давления для обоих потоков  $\Delta p_1^0, \Delta p_2^0$ . Эти условия можно записать в виде следующих неравенств-ограничений:

$$Q \geq Q^0; \quad \Delta p_1 \leq \Delta p_1^0; \quad \Delta p_2 \leq \Delta p_2^0. \quad (19)$$

Таким образом, мы сформулировали математическую задачу отыскания минимального значения для неявно выраженной нелинейной дискретно-непрерывной функции с ограничениями в виде неравенств. Подобная задача не имеет аналитического решения. Для ее решения численными методами было разработано программное обеспечение. Математическая модель содержит некоторые постоянные коэффициенты в эмпирических соотношениях, которые можно получить только через трудоемкие эксперименты.

### **Определение параметров математической модели**

Постоянные величины, входящие в эмпирические соотношения, для расчета промышленно выпускаемых теплообменников, получают обработкой экспериментальных данных. Такие эксперименты производятся для каждого типа разрабатываемых пластин и межпластинных каналов. Результаты этих тестов являются собственностью компаний производителей и обычно не публикуются.

Основываясь на описанной выше математической модели, была разработана методика численного эксперимента, которая позволяет определить параметры модели путем сравнения с результатами, полученными для тех же условий с использованием программ расчета, имеющихся в Интернете для большинства производителей теплообменных аппаратов. Результаты для некоторых пластин, производимых

## МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ПРОМИСЛОВОГО ОБЛАДНАННЯ

фирмой «Альфа Лаваль», представлены в табл. 1. Геометрические параметры пластин, для которых получены эти значения, приведены в табл. 2.

Таблица 1 – Параметры соотношений для некоторых теплообменных аппаратов производства «Альфа Лаваль», ( $Re > 250$ )

Тип пластины	Тип канала	A	N	Re	B	m
M3	H	0,265	0,7	<520	33,0	0,25
				≥520	10,7	0,07
	L	0,12	0,7	<1000	18,8	0,33
				≥1000	8,80	0,22
ML/MH <sup>1</sup>	0,18	0,7	<1000	44,0	0,40	
			≥1000	5,10	0,10	
M6	H	0,25	0,7	<1250	10,0	0,20
				≥1250	2,40	0
	L	0,12	0,7	<1500	5,10	0,30
				≥1500	1,70	0,15
ML/MH	0,165	0,7	<930	9,30	0,30	
			≥930	2,72	0,12	
M6M	H	0,27	0,7	<1300	11,7	0,13
				≥1300	4,55	0
	L	0,11	0,71	<2200	4,23	0,23
				≥2200	1,88	0,12
ML/MH	0,14	0,73	<2100	5,61	0,16	
			≥2100	1,41	0	
M10B	H	0,24	0,7	<2000	11,1	0,15
				≥2000	3,50	0
	L	0,11	0,7	<1500	12,0	0,36
				≥1500	2,42	0,14
ML/MH	0,12	0,74	<2700	6,20	0,20	
			≥2700	1,90	0,05	
M15B	H	0,26	0,7	-	5,84	0,05
	L	0,085	0,74	<2900	5,20	0,28
				≥2900	1,57	0,13
	ML/MH	0,13	0,74	<3500	4,30	0,15
≥3500				1,25	0	

Таблица 2 – Геометрические параметры некоторых пластин, производимых «Альфа Лаваль» ( $\delta$  – высота гофрировки,  $d_e$  – эквивалентный диаметр,  $b$  – ширина пластины,  $F_{pl}$  – площадь тепло передающей поверхности пластины,  $D_{con}$  – диаметр присоединений,  $f_{ch}$  – площадь поперечного сечения канала,  $L_p$  – приведенная длина)

Тип пластины	$\delta \cdot 10^3$ , м	$d_e \cdot 10^3$ , м	$b$ , м	$F_{pl}$ , м <sup>2</sup>	$D_{con}$ , м	$f_{ch} \cdot 10^3$ , м <sup>2</sup>	$L_p$ , м
M3	2,4	4,8	0,100	0,032	0,036	0,240	0,320
M6	2,0	4,0	0,216	0,15	0,05	0,432	0,694
M6M	3,0	6,0	0,210	0,14	0,05	0,630	0,666
M10B	2,5	5,0	0,334	0,24	0,10	0,835	0,719
M15B	2,5	5,0	0,449	0,62	0,15	1,123	1,381

<sup>1</sup> В данной работе небольшая разница между параметрами ML и MH каналов не учитывается

Сравнение результатов, полученных с помощью разработанного программного обеспечения с результатами, полученными благодаря свободно распространяемой программе «Альфа Лаваль», показали хорошее согласование (различие не более 4 % для площади поверхности теплообменника).

Необходимо заметить, что полученные соотношения и разработанное программное обеспечение можно использовать только на стадии предварительных расчетов при оптимизации ПТА или теплообменных сетей. Окончательный расчет при заказе оборудования должен быть произведен изготовителем оборудования.

### Примеры расчетов с использованием математической модели

Для того чтобы продемонстрировать, влияние количества ходов и пластин на характеристики теплообменного аппарата, рассмотрим следующие два примера. Один из теплообменников рассчитан для спиртового завода. Другой был взят из работы [6]. Расчеты производились с помощью разработанного программного обеспечения.

Пример 1. Необходимо нагреть 5 м<sup>3</sup>/ч спиртовой браги от 28 до 90 °С горячей водой, поступающей с температурой 95 °С и расходом 15 м<sup>3</sup>/ч. Давление обеих жидкостей 500 кПа. Допустимые потери давления для горячего теплоносителя 150 кПа, холодного – 100 кПа. Характеристики спиртовой браги постоянны: плотность 978,4 кг/м<sup>3</sup>; теплоемкость – 3,18 кДж/(кг·К); коэффициент теплопроводности – 0,66 Вт/(кг·м). Динамическая вязкость при температурах  $t=25; 60; 90$  °С принималась  $\mu=19,5; 16,6; 9,0$  сП.

Результаты расчетов для различного количества ходов  $X_1$  и  $X_2$  представлены в табл. 3. Анализ этих данных показывает, что минимальное количество пластин (38 пластин) достигается при  $X_1=2$  и  $X_2=4$  с использованием средних каналов МН/МЛ в теплообменнике. Самое близкое решение (41 пластина) получено при  $X_1=X_2=2$  со смешанной компоновкой каналов в одном ходе. Если бы в наличие имелся только один тип пластин, то минимальное количество пластин было бы 44 для Н и для L пластин, что на 15 % больше, чем для случая со смешанными каналами.

Таблица 3 – Влияние количества ходов и компоновки пластин на число пластин для теплообменника марки М6М для условий примера 1

$X_2$	$X_1$			
	1	2	3	4
1	<u>56 пластин</u> 1*28Н / 1*27Н	<u>235 пластины</u> 2*59Н/1*116Н	<u>157 пластин</u> 3*26Н/1*78Н	<u>184 пластины</u> 4*23Н/1*91Н
2	<u>72 пластины</u> 1*35Н / 2*18Н	<u>41 пластина</u> 2*(7Н+3*МЛ)/ 2*(7Н+3*МН)	<u>60 пластин</u> 3*10МН / 2*14МЛ	<u>64 пластины</u> 4*8Л / 1*15Л+1*16Л
3	<u>44 пластины</u> 1*21Н / 2*7Н+1*8Н	<u>49 пластин</u> 2*12МН / 3*8МЛ	<u>43 пластины</u> 3*(4МН+3*L)/ 3*(4МЛ+3*L)	<u>50 пластин</u> 3*6Л+1*7Л / 3*8Л
4	<u>63 пластины</u> 1*31МН / 1*7МЛ+3*8МЛ	<u>38 пластин</u> 2*9МН / 1*4МЛ+3*5МЛ	<u>44 пластины</u> 3*7Л / 2*5Л+2*6Л	<u>50 пластин</u> 3*6Л+1*7Л / 4*6Л

Пример 2. Рассматриваются условия, представленные в работе [6]. Необходимо охладить 40 кг/с горячей воды с начальной температурой 70 °С до 40 °С. Расход поступающей охлаждающей воды равен 30 кг/с, температура 30 °С. Допустимый перепад давления по горячей стороне  $\Delta p_1=40$  кПа, по холодной – 60 кПа. Результаты расчетов представлены в табл. 4. В первых пяти случаях (ряды табл. 4) расчеты проводились для чистых пластин.

Таблица 4 – Результаты расчетов для примера 2 (два теплообменника марки M10B, установленных параллельно)

№	Общая площадь, м <sup>2</sup>	Компоновка	Δр <sub>1</sub> , кПа	Δр <sub>2</sub> , кПа	R <sub>f</sub> 10 <sup>4</sup> , м <sup>2</sup> К/Вт	φ, %	F / F <sub>min</sub>
1	36,96	(3Н+35ML)/ (3Н+35МН)	39	26	0	0	1
2	63,92	64Н / 64Н	40	21	0*	68	1,73
3	38,88	40ML / 40МН	38	25	0	1	1,05
4	91,68	95L / 95L	14	8	0*	0	2,50
5	83,04	2*43L/2*43L	40	24	0*	62	2,25
6	59,04	(57Н+4ML)/ (57Н+4МН)	40	23	1,0 <sup>2</sup>	56	1,60
7	41,76	(15Н+28ML)/(15Н+28МН)	40	27	0,18	10 <sup>†</sup>	1,13
8	46,56	(26Н+22ML)/ (26Н+22МН)	40	26	0,37	20 <sup>†</sup>	1,26

Минимальная площадь поверхности теплопередачи достигается для смешанных каналов Н/ML – Н/МН (позиция 1). В этом случае допустимые потери давления по горячей стороне полностью реализуются и тепловая нагрузка точно равна заданной (запас φ равен нулю). Для компоновки одинаковых каналов (ML/МН) получена на 5 % большая площадь.

Для теплообменников с одинаковыми пластинами площадь поверхности намного больше. Для Н пластин (позиция 2) на 73 %, но при значительном запасе (68 %), для L пластин (позиция 4) площадь поверхности больше на 150 % при отсутствии запаса на тепловую нагрузку. В последнем случае перепад давления намного меньше допустимого. Увеличение числа ходов для L пластин (позиция 5) также увеличивает поверхность теплопередачи (на 125 %), но допустимый перепад давления используется полностью и запас составляет 62 %.

В примере, который рассмотрен в работе [6], термическое сопротивление загрязнению для обеих сторон пластин принималось равным 0,5·10<sup>-4</sup> м<sup>2</sup>·К/Вт (для данных по загрязнению поверхности теплопередачи теплообменника, представленных в работе [6], это значение является наибольшим). Для позиции 6 было использовано совокупное значение R<sub>f</sub> =1·10<sup>-4</sup> м<sup>2</sup>·К/Вт. Это привело к увеличению поверхности теплопередачи на 60 % – до 59,04 м<sup>2</sup> (авторы работы [6] получили 68,8 м<sup>2</sup> для пластин, рассматриваемых в их работе). Сравнивая результаты со значениями, представленными в позиции 2, можно заметить, что подобное ограничение для загрязнений не дает существенного выигрыша по сравнению с лучшим решением (на 10 %). Кроме того, это приводит к уменьшению скоростей в каналах, и как показано в работе [7], чрезмерное увеличение величины загрязнений может привести к повышенным загрязнениям на практике из-за уменьшения скорости потока и касательного напряжения на стенке пластины. В позициях 7 и 8 (табл. 4) приведены результаты расчетов с запасом 10 и 20 % от суммарного коэффициента теплопередачи. Площадь поверхности увеличилась на 13 и 26 % соответственно. Вычисленные соответствующие значения R<sub>f</sub> значительно меньше, и для запаса 20 % они очень близки к результатам, представленным в работе [6].

Из табл. 4 можно видеть, что для смешанной компоновки каналов, заданные значения допустимой потери давления для одного потока (в нашем случае горячего) полностью удовлетворяются. Из этого следует что, используя пластины с различной гофрировкой в одном аппарате, мы фактически можем менять тепловые и гидравлические характеристики пакета пластин непрерывно. Уровень дискретности эквивалентен одной пластине в пакете. Это позволяет с высокой точностью удовлетворять заданные условия проектирования теплообменного аппарата.

### **Выводы**

Разработанная математическая модель для проектирования многоходовых пластинчатых теплообменников со смешанными каналами в одном аппарате позволяет сократить величину площади теплообмена на стадии проектирования за счет более точного удовлетворения заданным входным условиям. Для промышленных пластин численным экспериментом получены постоянные эмпирических соотношений, входящие в уравнения математической модели. Достоверность математической модели доказана

<sup>2</sup> Это значение определено в ходе вычислений



сравнением с имеющимися в литературе решениями. Представленные примеры результатов расчетов показали возможность получения оптимальных решений с помощью этого метода.

Литература

1. Wang L, Sunden B, Manglik R.M. PHEs. Design, Applications and Performance. WIT Press, Southampton, 2007.
2. Compact Heat Exchangers. Selection, Design and Operation. / J.E Hesselgreaves.– Pergamon Press.– An Imprint of Elsevier Science., 2001.– 437 p.
3. Shah R.K., Seculic D.P. Fundamentals of Heat Exchanger Design. Wiley and sons, New Jersey, 2003. – 941 p.
4. Пластинчатые теплообменники в промышленности /Л. Л. Товажнянский, П.А. Капустенко, Г.Л. Хавин, О.П. Арсеньева. – Харьков: НТУ „ХПИ”, 2004.– 232 с
5. Оптимальный расчет многоходовых разборных пластинчатых теплообменников / Л.Л. Товажнянский, П.А. Капустенко, В.Ф. Павленко, И.Б. Деревянченко, Т.Г. Бабак, В.Ф. Лупырь // Химическое и нефтяное машиностроение, 1992. –28, №6.– С. 6–9.
6. Wang L, Sunden B. Optimal design of PHEs with and without pressure drop specifications // Applied Thermal Engineering, 2003. – 23. – P. 295–311.
7. Accounting for fouling in plate heat exchanger design / Gogenko A.L, Anipko O.B, Arsenyeva O.P, Kapustenko P.O. // Chemical Engineering Transactions, 2007.–12.– P. 207–213.

Bibliography (transliterated)

1. Wang L, Sunden B, Manglik R.M. PHEs. Design, Applications and Performance. WIT Press, Southampton, 2007.
2. Compact Heat Exchangers. Selection, Design and Operation. J.E Hesselgreaves.– Pergamon Press.– An Imprint of Elsevier Science., 2001.– 437 p.
3. Shah R.K., Seculic D.P. Fundamentals of Heat Exchanger Design. Wiley and sons, New Jersey, 2003. – 941 p.
4. Plastinchatye teploobmenniki v promyshlennosti /L. L. Tovazhnjanskij, P.A. Kapustenko, G.L. Havin, O.P. Arsen'eva. – Har'kov: NTU „HPI”, 2004.– 232 p.
5. Optimal'nyj raschet mnogohodovyh razbornyh plastinchatyh teploobmennikov L.L. To-vazhnjanskij, P.A. Kapustenko, V.F. Pavlenko, I.B. Derevjanchenko, T.G. Babak, V.F. Lupyry' Himicheskoe i nefljanoe mashinostroenie, 1992. –28, #6.– p. 6–9.
6. Wang L, Sunden B. Optimal design of PHEs with and without pressure drop specifications Applied Thermal Engineering, 2003. – 23. – P. 295–311.
7. Accounting for fouling in plate heat exchanger design Gogenko A.L, Anipko O.B, Arsenyeva O.P, Kapustenko P.O. Chemical Engineering Transactions, 2007.–12.– P. 207–213.

УДК 66.045.01

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

**МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ РОЗБІРНИХ ПЛАСТИНЧАСТИХ ТЕПЛООБМІННИКІВ**

Розглянуто оптимальне проектування багатоходового пластинчатого розбірною теплообмінного апарату з використанням різних типів пластин. Сформульована математична задача пошуку мінімуму неявно заданої функції нелінійної дискретно безперервної цільової функції з обмеженням у вигляді нерівностей. Для урахування термічних та гідравлічних характеристик каналів, що утворюються пластинами з різним гофруванням, у формулах для підрахування тепловіддачі і гідравлічного опору використовуються показники степені і коефіцієнти знайдені за допомогою чисельного експерименту. Розроблено метод та програмне забезпечення чисельного експерименту знаходження параметрів моделі шляхом порівняння одержаних результатів з результатами розрахунків, що можна одержати за програмами з Інтернету на сайтах виробників пластинчатого теплообмінного обладнання. Одержані набори таких параметрів для деякого числа пластин, що виготовляються серійно. Наданий підхід реалізовано у вигляді пакету програм для розрахунків пластинчатих теплообмінників.

Arsenyeva O., Tovazhnyansky L., Kapustenko P., Khavin G.

**MATHEMATICAL MODELLING AND OPTIMAL DESIGN OF PLATE-AND-FRAME HEAT EXCHANGERS**

The optimal design for multi pass plate-and-frame heat exchanger with mixed grouping of plates is considered. It is formulated as the mathematical problem of finding the minimal value for implicit nonlinear discrete/continues objective function with inequality constraints. To account for thermal and hydraulic performance of channels between plates with different geometrical forms of corrugations, the exponents and coefficients in formulas to calculate heat transfer coefficients and friction factors are used as model parameters. The procedure and software for numerical experiment to identify model parameters by comparing the calculation results with those obtained with free available in web computer programs of plate manufacturers is developed. The sets of such parameters are obtained for a number of industrially manufactured plates. The described approach is implemented as software for plate heat exchangers calculation.

Александров Е.Е., Александрова Т.Е., Пидашов В.В., Шматько И.А.

**ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВНЕШНИХ ВОЗМУЩЕНИЙ,  
ДЕЙСТВУЮЩИХ НА УПРУГУЮ ТАНКОВУЮ ПУШКУ  
В КАНАЛЕ ВЕРТИКАЛЬНОГО НАВЕДЕНИЯ**

**Постановка задачи.** В статьях [1–3] предложена математическая модель возмущённого движения упругого ствола танковой пушки как объекта стабилизации в окрестности состояния установившегося равновесия:

$$\begin{aligned} I_o \ddot{\varphi}(t) - a \Delta \ddot{T}(t) &= -k_m k_o \alpha(t) + \mu \varphi_k(t); \\ a \ddot{\varphi}(t) + c \Delta \ddot{T}(t) + \zeta b \Delta \dot{T}(t) + b \Delta T(t) &= v \ddot{z}_k(t), \end{aligned} \quad (1)$$

где  $v = m \frac{2l}{\pi}$ .

При движении танка по пересечённой местности величины  $\dot{\varphi}_k(t)$  и  $\ddot{z}_k(t)$  являются случайными функциями времени.

В статье [4] приведены со ссылкой на работу [5] спектральные плотности случайных функций  $\dot{\varphi}_k(t)$  и  $\ddot{z}_k(t)$  и на основе их предложен алгоритм генерации функций  $\dot{\varphi}_k(t)$  и  $\ddot{z}_k(t)$ . Недостатком такого подхода является то, что он не учитывает статистических свойств грунта, по которому движется танк, а в качестве спектральных плотностей  $S_{\dot{\varphi}}(\omega)$  и  $S_{\ddot{z}}(\omega)$  выбираются некоторые усреднённые кривые.

В настоящей работе алгоритм генерации случайных функций  $\dot{\varphi}_k(t)$  и  $\ddot{z}_k(t)$  предложен с учетом скорости движения танка по различным грунтам, что позволяет создать адаптированную к внешним условиям движения систему наведения и стабилизации танковой пушки.

**Решение задачи.** В работе [6] приведены дифференциальные уравнения возмущенного движения подрессоренной части корпуса танка, которые записываются в виде:

$$\begin{aligned} \ddot{Z}_k(t) + \xi \cdot \dot{Z}_k(t) + a \cdot Z_k(t) + \vartheta \cdot \dot{\varphi}_k(t) + b \cdot \varphi_k(t) &= A(t) + B(t); \\ \ddot{\varphi}_k(t) + \delta \cdot \dot{\varphi}_k(t) + K \cdot \varphi_k(t) + \gamma \cdot \dot{Z}_k(t) + d \cdot Z_k(t) &= C(t) + D(t), \end{aligned} \quad (2)$$

где правые части и коэффициенты уравнений (8) равны:

$$\begin{aligned} A(t) &= \frac{cg}{G} \sum_{i=1}^n h \left( t + \frac{l_i}{V(t)} \right); & B(t) &= \frac{\mu g}{G} \sum_{i=1}^{2n} \dot{h} \left( t + \frac{l_{ai}}{V(t)} \right); \\ C(t) &= \frac{c}{I_y} \sum_{i=1}^n l_i h \left( t + \frac{l_i}{V(t)} \right); & D(t) &= \frac{\mu}{I_y} \sum_{i=1}^{2n} l_{ai} \dot{h} \left( t + \frac{l_{ai}}{V(t)} \right); \\ \xi &= \frac{2n g \mu}{G}; & a &= \frac{2n g c}{G}; & v &= \frac{\mu g}{G} \sum_{i=1}^{2n} l_{ai}; & b &= \frac{cg}{G} \sum_{i=1}^{2n} l_i; \\ \delta &= \frac{\mu}{I_y} \sum_{i=1}^{2n} l_{ai}^2; & K &= \frac{c}{I_y} \sum_{i=1}^{2n} l_i^2; & \gamma &= \frac{\mu}{I_y} \sum_{i=1}^{2n} l_{ai}; & d &= \frac{c}{I_y} \sum_{i=1}^{2n} l_i, \end{aligned}$$

причем  $G_{II}$  – вес подрессоренной части корпуса танка;  $I_y$  – главный центральный момент инерции подрессоренной части корпуса танка относительно главной центральной поперечной оси;  $\mu$  – средний коэффициент сопротивления амортизатора;  $c$  – коэффициент жёсткости подвески;  $l_{ai}$  – расстояния по горизонтали от центра тяжести подрессоренной части корпуса танка до места крепления  $i$ -го амортизатора;  $l_i$  – расстояние от центра тяжести подрессоренной части корпуса танка до места крепления  $i$ -го балансира;  $h(t)$  – высота неровности под центром тяжести подрессоренной части корпуса;  $V(t)$  – текущая скорость движения танка.

В работе [7] показано, что корреляционная функция случайной функции  $h(t)$  имеет вид:

$$K(\tau) = D e^{-\alpha V \tau} \cos(\beta V \tau),$$

где  $D$  – дисперсия высот неровностей дороги;  $V$  – скорость движения танка;  $\alpha, \beta$  – коэффициенты корреляции, определяемые свойствами грунта, численные значения которых приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Значения коэффициентов корреляции

Вид дороги	Асфальтобетон	Мостовая	Грунтовая
$\alpha$	0,22	0,32	0,47
$\beta$	0,44	0,64	0,94

С помощью интеграла Фурье в работе [7] получено соотношение для спектральной плотности высот неровностей дороги:

$$S(\omega) = D \left[ \frac{2\alpha V (\alpha^2 V^2 + \beta^2 V^2 + \omega^2)}{\omega^4 + 2\omega^2 V^2 (\alpha^2 - \beta^2) + V^4 (\alpha^2 + \beta^2)^2} \right]. \quad (3)$$

Известно, что спектральная плотность выходного сигнала динамического звена  $S_y(\omega)$  с передаточной функцией  $W(p)$  связана со спектральной плотностью входного сигнала  $S_x(\omega)$  соотношением [8]:

$$S_y(\omega) = |W(j\omega)|^2 S_x(\omega). \quad (4)$$

Если предположить, что на вход динамического звена подан единичный "белый шум"  $\zeta(t)$ , то соотношение (4) преобразуется к виду:

$$S_y(\omega) = |W(j\omega)|^2. \quad (5)$$

Реализация случайной функции  $h(t)$  может быть получена, если единичный "белый шум"  $\zeta(t)$  подать на вход колебательного динамического звена с передаточной функцией:

$$W(p) = K_\xi \cdot (T_1^2 p^2 + T_2^2 p + 1)^{-1}, \quad (6)$$

причем коэффициент усиления  $K_\xi$  и постоянные времени  $T_1$  и  $T_2$  определяются соотношениями:

$$K = \sqrt{S(0)}; \quad T_1^4 = \frac{1}{\omega_p^4} \left[ 1 - \frac{S(0)}{S(\omega_p)} \right]; \quad T_2^2 = \frac{2}{\omega_p^2} \sqrt{1 - \frac{S(0)}{S(\omega_p)}} \left[ 1 - \sqrt{1 - \frac{S(0)}{S(\omega_p)}} \right],$$

где  $\omega_p$  – резонансная частота соответствующей кривой спектральной плотности.

Для разных типов грунтов и разных скоростей движения танка значения коэффициента усиления  $K_\xi$  и постоянных времени  $T_1$  и  $T_2$  приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Значения постоянных времени  $T_1^2$  и  $T_2$  и коэффициента усиления  $K_\xi$

V; м·с <sup>-1</sup>	Тип грунта		
	асфальтобетон	мостовая	грунтовая
5	$K_\xi = 0,192;$ $T_1^2 = 0,162c^2; T_2 = 0,265c$	$K_\xi = 0,173;$ $T_1^2 = 0,077c^2; T_2 = 0,201c$	$K_\xi = 0,13;$ $T_1^2 = 0,034c^2; T_2 = 0,12c$
10	$K_\xi = 0,13;$ $T_1^2 = 0,043c^2; T_2 = 0,131c$	$K_\xi = 0,112;$ $T_1^2 = 0,02c^2; T_2 = 0,092c$	$K_\xi = 0,087;$ $T_1^2 = 0,009c^2; T_2 = 0,057c$
20	$K_\xi = 0,095;$ $T_1^2 = 0,011c^2; T_2 = 0,068c$	$K_\xi = 0,081;$ $T_1^2 = 0,005c^2; T_2 = 0,047c$	$K_\xi = 0,067;$ $T_1^2 = 0,002c^2; T_2 = 0,064c$

Из соотношения (5) запишем дифференциальное уравнение динамического звена, формирующего случайную функцию  $h(t)$  при подаче на его вход единичного "белого шума"  $\zeta(t)$ :

$$T_1^2 \ddot{h}(t) + T_2 \dot{h}(t) + h(t) = K_\xi \zeta(t). \quad (7)$$

Используя уравнения (1) и (7) для каждой реализации единичного "белого шума"  $\zeta(t)$  получаем реализации случайных функций  $\dot{\phi}_k(t)$  и  $\ddot{z}_k(t)$ , входящие в правые части дифференциальных уравнений (1).

**Пример.** К уравнениям (1), (2) и (7) добавим уравнения стабилизатора танковой пушки [9]:

$$\begin{aligned} I_k \ddot{\beta}(t) + f \dot{\beta}(t) + c_n \alpha(t) &= K_e i_y(t); \\ L_y \left[ \dot{i}_y(t) \right] + r_y i_y(t) &= U_\varphi(t); \\ \sigma(t) &= k_\varphi \varphi(t) + k_\phi \dot{\phi}(t); \\ U_\varphi(t) &= \begin{cases} \sigma(t), & \text{при } \sigma(t) \leq U_{y^*}; \\ U_{y^*} \text{sign}(\sigma(t)), & \text{при } \sigma(t) > U_{y^*}, \end{cases} \end{aligned} \quad (8)$$

где  $\beta(t)$  – угол поворота коромысла стабилизатора;  $i_y(t)$  – ток в управляющей обмотке электромагнита электрогидравлического усилителя;  $U_\varphi(t)$  – управляющий сигнал, формируемый электронным блоком управления;  $I_k$  – момент инерции коромысла;  $f$  – коэффициент жидкостного трения;  $c_n$  – коэффициент жёсткости фиксирующей пружины;  $r_y$  – омическое сопротивление обмотки якоря электромагнита;  $L_y$  – индуктивность обмотки якоря;  $k_\varphi$  и  $k_\phi$  – коэффициенты усиления электронного блока.

Совместное решение дифференциальных уравнений (1), (2), (7) и (8) позволяет получить процессы стабилизации танковой пушки при различных реализациях функции  $\zeta(t)$ . Для одной из реализаций процессы приведены на рис. 1.

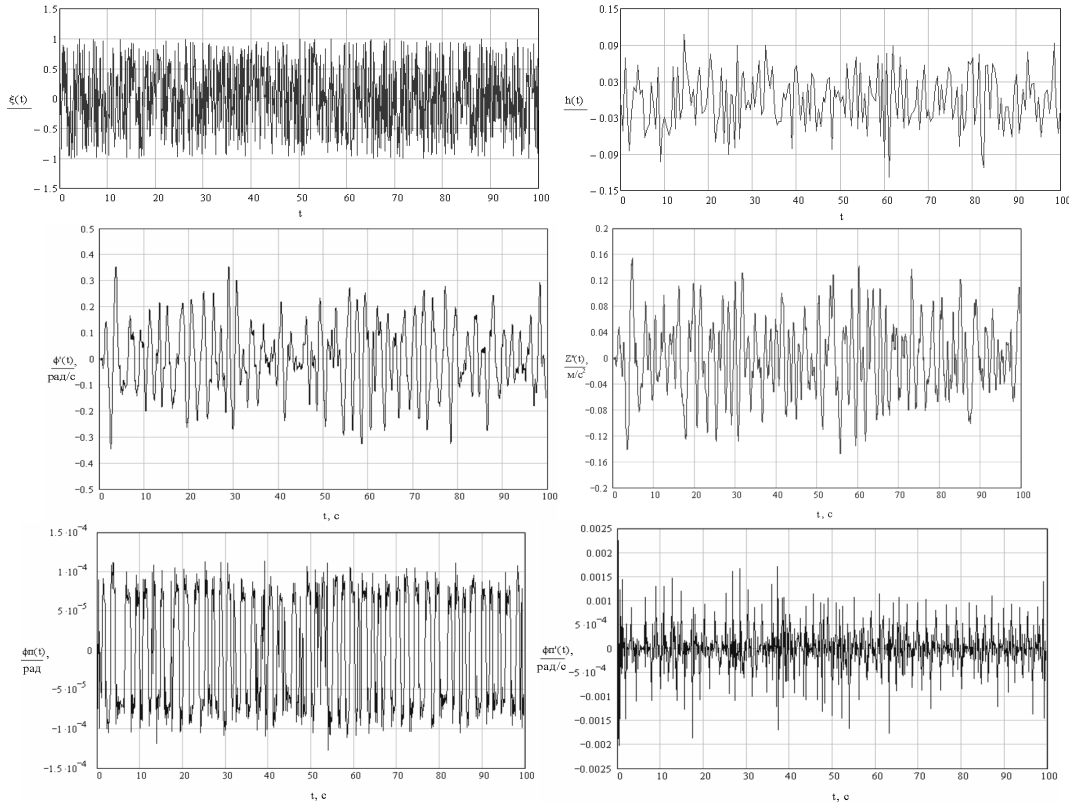


Рисунок 1 – Переходные процессы стабилизации танковой пушки для одной реализации функции  $\zeta(t)$

Литература

1. Александров Е.Е. Танковая пушка с упругим стволом как объектом стабилизации / Е.Е. Александров, О.Я. Никонов, Б.А. Олиарник // Артиллерийское и стрелковое вооружение. – 2005. – № 2. – С. 44–47.
2. Александров Е.Е. О возмущениях, действующих на пушку, при движении танка по пересечённой местности / Е.Е. Александров, В.Н. Кюрчев // Механика та машинобудування. – 2002. – № 1. – С. 93–96.
3. Александров Е.Е. Построение области устойчивости замкнутой системы наведения и стабилизации танковой пушки в плоскости коэффициентов усиления электронного блока управления / Е.Е. Александров, О.Я. Никонов, Б.А. Олиарник // Артиллерийское и стрелковое вооружение. – 2004. – № 3. – С. 15–18.
4. Александров Е.Е. Имитационное моделирование внешних возмущений, действующих на упругий ствол танковой пушки / Е.Е. Александров, О.Я. Никонов, Б.А. Олиарник // Артиллерийское и стрелковое вооружение. – 2005. – № 3. – С. 29–32.
5. Александров Е.Е. Параметрический синтез систем стабилизации танкового вооружения / Александров Е.Е., Богаенко И.Н., Кузнецов Б.И. – Киев: Техніка, 1997. – 112 с.
6. Александров Е.Е. Параметрический синтез системы с переменной структурой для наведения и стабилизации танковой пушки / Е.Е. Александров, Т.Е. Александрова, О.Я. Никонов, В.В. Пидашов // Артиллерийское и стрелковое вооружение. – 2008. – № 1. – С. 49–53.
7. Туренко А.Н. Системотехника транспорта / Туренко А.Н., Говорущенко Н.Я. – Харьков: ХГАДТУ, 1998. – 255 с.
8. Вентцель Е.С. Теория вероятностей / Вентцель Е.С. – М.: Наука, 1964. – 576 с.
9. Александров Е.Е. Повышение точности наводки танковой пушки рациональным выбором параметров стабилизатора и ходовой части / Александров Е.Е., Пидашов В.В. // Артиллерийское и стрелковое вооружение. – 2006. – № 4. – С. 23–26.

Bibliography (transliterated)

1. Aleksandrov E.E. Tankovaja pushka s uprugim stvolom kak ob"ektom stabilizacii / E.E. Aleksandrov, O.Ja. Nikonov, B.A. Olijarnik Artillerijskoe i strelkovoje vooruzhenie. – 2005. – # 2. – p. 44–47.
2. Aleksandrov E.E. O vozmushhenijah, dejstvujushhijh na pushku, pri dvizhenii tanka po peresechjonnoj mestnosti / E.E. Aleksandrov, V.N. Kjurchev Mehanika ta mashinobuduvannja. – 2002. – # 1. – p. 93–96.
3. Aleksandrov E.E. Postroenie oblasti ustojchivosti zamknutoj sistemy navedenija i stabilizacii tankovoj pushki v ploskosti kojefficientov usilenija jelektronnogo bloka upravlenija / E.E. Aleksandrov, O.Ja. Nikonov, B.A. Olijarnik Artillerijskoe i strelkovoje vooruzhenie. – 2004. – # 3. – p. 15–18.
4. Aleksandrov E.E. Imitacionnoe modelirovanie vneshnih vozmushhenij, dejstvujushhijh na uprugij stvol tankovoj pushki / E.E. Aleksandrov, O.Ja. Nikonov, B.A. Olijarnik Artillerijskoe i strelkovoje vooruzhenie. – 2005. – # 3. – p. 29–32.
5. Aleksandrov E.E. Parametricheskij sintez sistem stabilizacii tankovogo vooruzhenija / Aleksandrov E.E., Bogaenko I.N., Kuznecov B.I. – Kiev: Tehnika, 1997. – 112 p.
6. Aleksandrov E.E. Parametricheskij sintez sistemy s peremЕННОJ strukturoj dlja navedenija i stabilizacii tankovoj pushki / E.E. Aleksandrov, T.E. Aleksandrova, O.Ja. Nikonov, V.V. Pidashov Artillerijskoe i strelkovoje vooruzhenie. – 2008. – # 1. – p. 49–53.
7. Turenko A.N. Sistemotehnika transporta / Turenko A.N., Govorushhenko N.Ja. – Har'kov: HGADTU, 1998. – 255 p.
8. Ventcel' E.S. Teorija verojatnostej / Ventcel' E.S. – M.: Nauka, 1964. – 576 p.
9. Aleksandrov E.E. Povyshenie tochnosti navodki tankovoj pushki racional'nym vyborom parametrov stabilizatora i hodovoj chasti / Aleksandrov E.E., Pidashov V.V. Artillerijskoe i strelkovoje vooruzhenie. – 2006. – # 4. – p. 23–26.

УДК 621.3.078.001

Александров Є.Є., Александрова Т.Є., Пидашов В.В., Шматько І.А.

**ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЗОВНІШНІХ ЗБУРЕНЬ,**

**ЩО ДІЮТЬ НА ПРУЖНУ ТАНКОВУ ГАРМАТУ В КАНАЛІ ВЕРТИКАЛЬНОГО НАВЕДЕННЯ**

В роботі пропонується алгоритм моделювання зовнішніх збурень, які діють на танкову гармату в каналі вертикального наведення під час руху танка по шляхам з різним покриттям та з різними швидкостями. Наведений приклад моделювання по одній реалізації "білого шуму".

Alexandrov E.E., Alexandrova T.E., Pidashov V.V., Shmatko I.A.

**IMITATION MODELING OF THE EXTERNAL INDIGNATIONS OPERATING ON THE ELASTIC TANK GUN IN THE PORT OF VERTICAL PROMPTING**

In work the algorithm of modeling of external indignations which operate on a tank gun in the port of vertical prompting during tank movement on roads with a different covering and with different speeds is offered. The modeling example on one realization of "white noise" is resulted.

**РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ГАРМОНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ СИСТЕМЫ «СТВОЛ–КОРПУС–ПОДВЕСКА» С ПОМОЩЬЮ РАЗЛОЖЕНИЯ В РЯД ФУРЬЕ**

**Актуальность и постановка задачи.** Точность стрельбы автоматического оружия характеризуется рядом взаимосвязанных параметров. Такими параметрами, согласно таблицам внешней баллистики, являются исходные данные стрельбы. Задание режима и условий стрельбы сводится к заданию отдельных их параметров в таком сочетании, при котором обеспечивается необходимая точность стрельбы, которая характеризуется меткостью и кучностью [2].

При стрельбе боевых колесных машин, на вооружении которых установлены малокалиберные автоматические пушки (МАП), в системе "ствол–корпус–подвеска" протекает ряд динамических процессов, которые в совокупности приводят к снижению точности попадания в цель. К таковым относятся [1]:

1) Колебания корпуса боевой машины, обусловленные неровностями дороги и отдачей пушки после выстрела;

2) Колебания пушки при стрельбе (стрельба с места и в движении);

3) Работа тормоза отката.

Колебания характеризуются такими параметрами [6]:

1. амплитудой колебаний, т.е. величиной наибольшего отклонения от положения равновесия,

2. периодом колебаний, т.е. временем одного полного колебания;

3. законом изменения колеблющейся величины во времени;

4. фазой колебаний.

При автоматической стрельбе влияние колебаний на точность стрельбы происходит иначе, чем при стрельбе одиночными выстрелами. В первую очередь это связано с тем, что при равномерном темпе стрельбы возможно возникновение резонанса колебаний, возобновляемого при каждой серии выстрелов. Во-вторых, при кратном числе колебаний и темпе стрельбы, возрастает амплитуда колебаний ствола, что в свою очередь негативно влияет на точность стрельбы. Также немаловажным фактором при стрельбе с ходу является состояние дорожного покрытия, которое характеризуется величиной неровности дороги. В результате, как при стрельбе, так и при движении боевой машины возникают возмущения, которые характеризуются частотой колебаний и их амплитудой. Для определения составляющих затухающих колебаний пушки, а так же определения взаимосвязи между колебаниями бронекорпуса и пушки необходимо рассмотреть две модели:

1. Модель динамики пушки при отсутствии движения.

2. Модель динамики пушки при движении.

При разработке математической модели введём два допущения:

– пушку рассматриваем как жесткий стержень, который жестко закреплён в боевом модуле с установленным тормозом отката;

– бронекорпус принимаем жестким, установленным на восьми упругих опорах.

Рассмотрим состояние системы, когда возмущений неровностей дороги нет, машина неподвижна. При этом система характеризуется вынужденными затухающими колебаниями пушки и бронекорпуса, возникающими в результате действия силы отдачи выстрела и силы упругости тормоза отката. Частота колебания пушки при стрельбе определяется темпом стрельбы.

МАП, установленные в боевых модулях, имеют два режима стрельбы: одиночный и очередью. При стрельбе одиночными выстрелами, колебания не влияют на точность стрельбы. Поскольку интервал времени между выстрелами  $\min[T] \geq t_{\text{зат}}$  больше времени затухания возмущений вызванных выстрелом. Таким образом, система успевает вернуться в исходное положение перед последующим выстрелом. В тоже время стрельба с места определяется точностью подготовки исходных данных стрельбы [3] и зазорами в механизмах удержания пушки. Уравнение суммарного отклонения ствола пушки при стрельбе с места принимает вид [6]:

$$\Delta X_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n \Delta X_i, \quad (1)$$

где  $n$  – число возмущающих факторов.

При этом не следует учитывать при стрельбе с места следующие факторы:



- возмущения возникающие при движении по неровностям;
- возмущения вызванные демпфирующими элементами подвески.

Основным режимом ведения огня МАП является стрельба очередями, поэтому в процессе стрельбы возникают негармонические затухающие колебания как результирующие ряда возмущений описанных выше.

В результате обработки экспериментальных данных стрельб [8] установлено, что размещение средней точки попадания по семи сериям стрельб представляется в форме эллипса (рис. 1). Идентифицировать полученные результаты возможно путём сравнения их с фигурами Лиссажу. Фигуры Лиссажу (ФЛ) – замкнутые траектории, прочерчиваемые точкой, совершающей гармонические колебания в двух взаимно перпендикулярных направлениях. При помощи ФЛ, определили частоту и отношение частот складываемых колебаний.

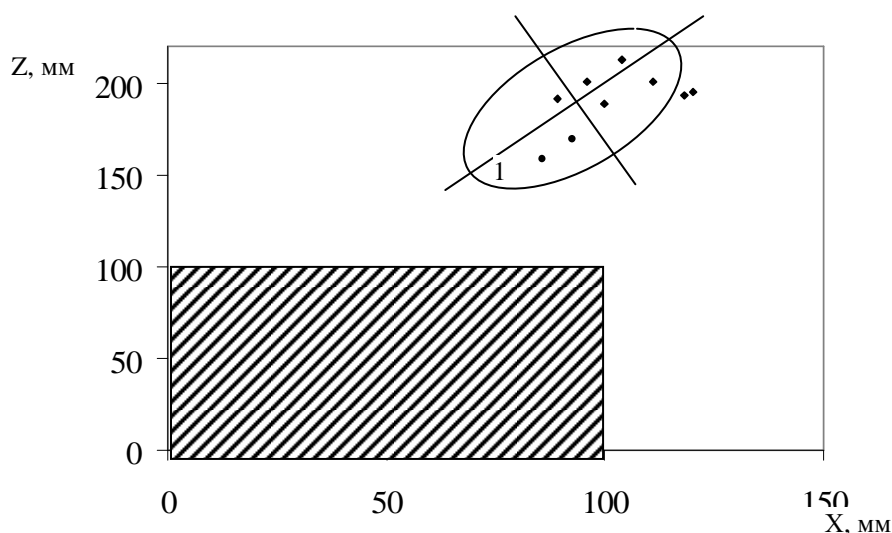


Рисунок 1 – Размещение средних точек попадания:

1 – область ограничивающаяся эллипсом, описываемая вокруг средних точек попадания

Вид фигур Лиссажу определяет соотношение между периодами (частотами), фазами и амплитудами обоих колебаний. По экспериментальным данным идентифицируем фигуры Лиссажу. Фигура, описываемая вокруг СТП, представляет эллипс. Данная фигура соответствует равенству обоих периодов и разности начальных фаз  $7\pi/4$  ( $315^\circ=5,5$  рад.).

Амплитуда смещения в результате колебаний корпуса боевой машины после выстрела:

$$x(t) = A \sin(\omega t + \varphi), \quad (2)$$

где  $\varphi$  – начальная фаза колебаний;  $(\omega t + \varphi)$  – фаза колебания;  $A$  – амплитуда колебаний;  $\omega = 2\pi/T$  – угловая частота колебаний;  $T$  – период колебаний.

Поскольку направления колебания системы происходят во взаимно перпендикулярных плоскостях друг к другу, то для каждой координаты изменение амплитуды во времени:

$$x(t) = a_0 \cdot \cos(\omega_1 \cdot t + \varphi_1), \quad (3)$$

$$y(t) = b_0 \cdot \cos(\omega_2 \cdot t + \varphi_2). \quad (4)$$

Траектория колебаний, имеющих форму эллипса, описывается уравнением (5), причем полуоси эллипса равны соответствующим амплитудам колебаний [6]:

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} - \frac{2xy}{ab} \cos(\varphi_2 - \varphi_1) = \sin^2(\varphi_2 - \varphi_1), \quad (5)$$

## МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ПРОМИСЛОВОГО ОБЛАДНАННЯ

где  $x, y$  – смещение точки вдоль координаты  $x$  и  $y$ ;  $a$  и  $b$  – амплитуды складываемых колебаний;  $(\varphi_2 - \varphi_1)$  – разность фаз колебаний.

Исходя из экспериментальных данных [8] координаты средней точки попадания (табл. 1) по семи сериям эксперимента, соответствуют отклонению колебаний ствола пушки вдоль осей  $x$  и  $y$  в данный момент времени при стрельбе в разных режимах, относительно точки прицеливания в центре мишени.

Таким образом, при отклонении составляющих колебаний в данный момент времени для обеспечения гарантированного попадания в цель для уравнения (5) должно выполняться условие  $(x; y \leq |a; b|)$ , соответственно результирующее отклонение в данный момент времени не должно превышать соответственно размеры цели:

$$r = \sqrt{x^2 + y^2}, \quad (6)$$

где  $r$  – результирующее отклонение в данный момент времени.

Таблица 1 – Координаты средней точки попадания

№	Режим стрельбы	координаты СТП, мм	
		X	Y
1	2	3	4
1	4 одиночных выстрела	96,2	201,6
2	Очередь из 2 выстрелов	119,6	195,5
3	Очередь из 3 выстрелов	111,2	201,2
4	Очередь из 4 выстрелов	88,9	191,4
5	Одиночный выстрел на борт	104,7	213,3
6	Очередь из 3 выстрелов на борт	118,3	193,3
7	Очередь из 2 выстрелов с ручных приводов	100,7	189

В механических системах, участвующих в колебательном движении присутствуют силы сопротивления тормоза отката, жесткость подвески, действие которых достаточно интенсивно приводит к уменьшению энергии системы. Это проявляется в затухании колебаний, поскольку  $E_{\text{сист.}} \sim A^2$ , то при  $E \rightarrow 0$  и  $A$  уменьшается до 0.

Дифференциальное уравнение затухающих колебаний [6]:

$$\ddot{x} + 2\beta\dot{x} + \omega_0^2 x = 0, \quad (7)$$

где  $\beta = \frac{r}{2m}$  – коэффициент затухания;  $\omega_0^2 = \frac{\kappa}{m}$  – круговая частота колебаний;  $r$  – коэффициент сопротивления, при условии что возвращающая сила пропорциональна смещению  $\Delta x$  из условия:

$$m\ddot{x} = -\kappa x - rx, \quad (8)$$

где  $F_c = -rx$  – сила сопротивления.

При существенно затухающих колебаниях системы, когда  $\beta > \omega_0$  решение уравнения (7) имеет вид:

$$x = c_1 e^{-\lambda_1 t} + c_2 e^{-\lambda_2 t}, \quad (9)$$

где  $c_1$  и  $c_2$  – коэффициенты подлежащие определению из условий однозначности  $x_0$  и  $\dot{x} = v_0$ .

Коэффициенты определяются из выражений:

$$C_1 = \frac{F_0 (\omega_0^2 - \omega^2)}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\beta^2 \omega^2}, \quad (10)$$

$$C_2 = \frac{\frac{F_0}{m} 2\beta\omega}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\beta^2\omega^2}. \quad (11)$$

При таких условиях движение является неперiodическим, и система возвращается в исходное положение, не совершая колебаний. Причем если:

$$\lambda_1 = \beta + \sqrt{\beta^2 - \omega_0^2}, \quad (12)$$

и

$$\lambda_2 = \beta - \sqrt{\beta^2 - \omega_0^2}. \quad (13)$$

То, задаваясь значениями  $\beta$ ,  $\omega_0$ ,  $g$ , получим закон изменения координаты при затухании колебаний при  $\omega_0 > \beta$ ,  $r < 2\sqrt{mk}$ ,  $\omega < \omega_0$ .

Очевидно, что предельный случай аперiodического движения соответствует условию  $\beta = \omega_0$ ,  $\omega = 0$ ,  $r = 2\sqrt{mk}$ .

С учетом того, что рассматриваемая система совершает вынужденные колебания под действием внешней силы  $F_{\text{внешн.}}$ , то выражение (8) запишем в виде:

$$m\ddot{x} = F + F_c + F_{\text{внешн.}}. \quad (14)$$

Соответственно правая часть уравнения (6) будет не равна нулю, а равна закону изменения внешней силы от времени. Для рассматриваемой системы такой закон определяется темпом стрельбы. В модели будем считать, что воздействие описывается гармоническим законом:

$$F_e = F_0 \cos \omega t, \quad (15)$$

где  $\omega$  – круговая частота колебаний, определяемая темпом стрельбы;  $F_0$  – амплитуда вынуждающей силы.

С учетом (15) перепишем (7) в виде:

$$\ddot{x} + 2\beta\dot{x} + \omega_0^2 x = f_0 \cos \omega t, \quad (16)$$

где  $f_0 = \frac{F_0}{m}$  – нормированная амплитуда вынуждающей силы.

Полное решение этого уравнения имеет вид [6]:

$$x(t) = A \cos(\omega t - \alpha) + A e^{-\beta t} \cos(\sqrt{\omega_0^2 - \beta^2} t + \varphi_0), \quad (17)$$

где  $A = \frac{f_0}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\beta^2\omega^2}}$  – амплитуда колебаний;  $\alpha = \arctg \frac{2\omega\beta}{\omega_0^2 - \omega^2}$  – смещение по фазе.

$A_0$  и  $\varphi_0$  определяются начальными условиями.

С учетом поглощения энергии в механической системе решение уравнения вынужденных колебаний запишем в виде:

$$x(t) = A_{\Pi}(\omega) \sin \omega t + A_{\Delta}(\omega) \cos \omega t, \quad (18)$$

где  $A_{\Pi}$  – амплитуда поглощения;  $A_{\Delta}$  – упругая амплитуда.

Которые определяются как:

$$A_{II}(\omega) = \frac{2\beta\omega f_0}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\beta^2\omega^2}, \quad (19)$$

$$A_{II}(\omega) = \frac{(\omega_0^2 - \omega^2)f_0}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\beta^2\omega^2}. \quad (20)$$

Любая колебательная система в общем случае может совершать одновременно несколько колебаний, приводящих к смещению всей системы. Как известно [6] к таким системам применяют принцип суперпозиции, в соответствии с которым отклонение результирующего колебания определяется уравнением (1).

В свою очередь такое результирующее отклонение может быть аппроксимировано гармоническим законом:

$$x = A \sin(\omega t + \varphi_0), \quad (21)$$

где  $A$  – абсолютное значение векторной суммы векторов, составляющих отклонение системы.

Для определения частот, составляющих негармонические колебания, представим сложные колебания системы в виде суперпозиции одновременно совершающихся гармонических колебаний, для чего воспользуемся разложением в ряд Фурье [5], где члены ряда Фурье, определяющие гармонические колебания с частотами  $n\omega$ , являются гармониками негармонического колебания:

$$A(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \sin(n\omega t + \varphi_n), \quad (22)$$

где  $\varphi_n = \arctg \frac{a_n}{b_n}$  – сдвиг фазы.

Амплитуда  $A_n$  гармоники определяется как:

$$A_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2}, \quad (23)$$

где  $a_n$  и  $b_n$  – коэффициенты Фурье.

Коэффициенты Фурье определяются из условий:

$$a_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} A(t) \cos n\omega t dt, \quad (24)$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} A(t) \sin n\omega t dt. \quad (25)$$

Во втором случае причиной, вызывающей колебания корпуса боевой машины при движении, являются неровности дороги. Профиль дороги рассматриваем как сочетание отдельных неровностей, характеризующихся длиной, высотой, формой и чередованием. Радиус колеса БТР значительно больше высоты неровности, а упругая шина обладает способностью сглаживать резкие очертания неровностей. Поэтому профиль неровностей принимают синусоидальным относительно средней линии неровности. Дорожную неровность представим в виде сдвинутой синусоиды (рис. 2), которая описывается уравнением [4]:

$$\eta = \eta_0 \left( 1 - \cos 2\pi \frac{x}{L} \right), \quad (26)$$

где  $\eta_0, L$  – максимальная высота и длина неровности;  $\eta, x$  – текущие значения высоты и длины неровности.

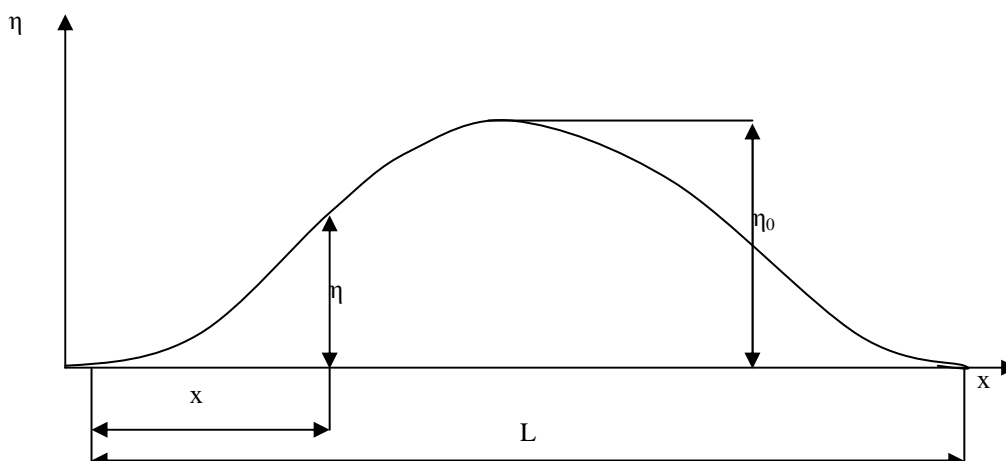


Рисунок 2 – Схема неровности синусоидального профиля

При движении, высота неровности представляется в виде  $\eta = f(\tau)$ . При отсутствии движения  $\eta = 0$ .  
 Вследствие допущения о равномерном прямолинейном движении боевой машины, текущее значение неровности дороги можно записать:

$$x = Vt, \quad (27)$$

где  $V$  – скорость движения;  $t$  – текущее время движения.

Тогда

$$\eta = \eta_0 (1 - \cos \omega t), \quad (28)$$

где  $\omega = \frac{2\pi V}{L}$  – частота следования дорожных неровностей.

При единичных неровностях понятие частоты теряет смысл, и тогда величину  $\omega_0$  связывают со временем проезда неровности:

$$T = \frac{2\pi}{\omega_0}. \quad (29)$$

Расстояние между повторяющимися неровностями принимается 1–1,5 базы боевой машины, а высота неровности принимается до 140–150 мм [7]. Возмущения, связанные с неровностями дороги, имеют максимальную частоту следования дорожных неровностей  $\omega_{\max} = 5-7 \text{ с}^{-1}$ .

**Выводы.** Предложенная методика определения значений параметров колебаний системы "ствол–корпус–подвеска" позволяет определить значения характеристик колебаний вызванных возмущениями системы как при стрельбе с места, так и в движении.

#### Литература

1. Алфёров В.В. Конструкция и расчет автоматического оружия. – М.: Машиностроение, 1977.– 248 с.
2. Чуев Ю.В. Проектирование ствольных комплексов. – М: Машиностроение, 1976 – 216с.
3. Извеков Е.В., Каплунов Б.А. Оптимизация обеспечения стрельбы артиллерии. – М.: Воениздат, 1979. – 112 с.

4. Голомбовский А.К. и др. Теория и расчет автоматического оружия. – Пенза: Издательство ПВАИУ им. Н.Н. Воронова, 1980. – 493 с.
5. Бронштейн И. Н., Семендяев К. А. Справочник по математике для инженеров и учащихся вузов. – М.: Наука, 1981.–720с.
6. Андронов А.А., Витт А.А., Хайкин С.В. Теория колебаний. М.: Физматгиз, 1959. – 916 с.
7. Жадан В.А., Кононенко В.А., Кудров В.М., Мушинский Ю.М. О совершенствовании системы поддресоривания, направленном на повышение подвижности танка. // Механіка та машинобудування-№2. – 2004. С. 148–153.
8. Розробка заходів по забезпеченню влучності 30 мм автоматичної пушки бойових модулів «Гром», «Штурм» для БТР-60, БТР-70, БТР-3, БТР-4 що модернізуються: звіт про НДР 21.11.2008/ Академія внутрішніх військ МВС України; керівн. О.Б. Аніпко; викон. Д.С. Баулін, О.М. Рікунов. – Х., 2008.– 74 с. – Інв. №64.

Bibliography (transliterated)

1. Alfjorov V.V. Konstrukcija i raschet avtomaticheskogo oruzhija. – М.: Mashinostroenie, 1977.– 248 p.
2. Chuev Ju.V. Proektirovanie stvol'nyh kompleksov. – М.: Mashinostroenie, 1976 – 216s.
3. Izvekov E.V., Kaplunov B.A. Optimizacija obespechenija strel'by artillerii. – М.: Voenizdat, 1979. – 112 p.
4. Golombovskij A.K. i dr. Teorija i raschet avtomaticheskogo oruzhija. – Penza: Izdatel'stvo PVAIU im. N.N. Voronova, 1980. – 493 p.
5. Bronshtejn I. N., Semendjaev K. A. Spravochnik po matematike dlja inzhenerov i uchashhihsja vuzov.– М.: Nauka, 1981.–720s.
6. Andronov A.A., Vitt A.A., Hajkin S.V. Teorija kolebanij. М.: Fizmatgiz, 1959. – 916 p.
7. Zhadan V.A., Kononenko V.A., Kudrov V.M., Mushhinskij Ju.M. O sovershenstvovanii sistemy podressorivanija, napravlennom na povyszenie podvizhnosti tanka. Mehanika ta mashinobuduvannja-#2. – 2004. p. 148–153.
8. Rozrobka zahodiv po zabezpechennju vluchnosti 30 mm avtomatichnoї pushki bojovih moduliv «Grom», «Shturm» dlja BTR-60, BTR-70, BTR-3, BTR-4 shho modernizujut'sja: zvit pro NDR 21.11.2008 Aka-demija vnutrishnih vijs'k MVS Ukraїni; kerivn. O.B. Anipko; vikon. D.S. Baulin, O.M. Rikunov. – H., 2008.– 74 p. – Inv. #64.

УДК 623.4.01

Аніпко О.Б., Рікунов О.М.

**ВИРІШЕННЯ ЗАДАЧІ ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ГАРМОНІЧНИХ КОЛИВАНЬ СИСТЕМИ «СТВОЛ–КОРПУС–ПІДВІСКА» ЗА ДОПОМОГОЮ РОЗКЛАДАННЯ В РЯД ФУР'Є**

Розглянуто методику визначення значень параметрів гармонічних коливань системи «ствол-корпус-підвіска» за допомогою розкладання в ряд Фур'є, зумовлених збурюванням системи при стрільбі як з місця так і в русі.

Anipko O.B., Rikunov O.N.

**THE DECISION OF THE PROBLEM DEFINITION OF PARAMETERS THE HARMONIOUS SWUNG OF THE SYSTEM "BARREL–HULL–SUSPENSION" BY MEANS EXPANSION FOURIER SERIES**

The technique of definition values parametres the harmonious swung of the system "barrel-hull-suspension" by means expansion Fourier series, caused by system's disturbance at shooting both from a place, and in movement is considered

Кучер Д.Б., Харланов А.И., Медведь И.В., Литвиненко Л.В., Корощенко Н.Н.

**МОДЕЛЬ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО ПОРАЖЕНИЯ ПОДЗЕМНЫХ МНОГОПРОВОДНЫХ РАДИОЧАСТОТНЫХ ЛИНИЙ СВЯЗИ МОЩНЫМИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМИ ИЗЛУЧЕНИЯМИ**

**Актуальность и постановка задачи.** Одним из факторов, представляющих угрозу нормальному функционированию подземных кабельных радиочастотных линий связи (КРЛС), является воздействие на них мощных электромагнитных излучений (МЭМИ) различного происхождения [1–4]. Под влиянием переменных электромагнитных полей, создаваемых источниками МЭМИ (грозовой разряд, излучение мощных радиопередающих средств и новейшие системы радиоэлектронной борьбы), на проводящих элементах линий связи наводятся напряжения и токи, которые могут стать причиной расплавления диэлектрических компонентов (функционального поражения) [1–4].

При анализе воздействия МЭМИ на линии передачи информации следует учитывать место их расположения, поскольку процессы взаимодействия переменных электромагнитных полей с проводниками зависят и от среды, окружающей кабель. Так для подземных радиочастотных линий связи земля выступает в роли проводящего полупространства и существенным образом влияет на их электрические характеристики [5, 6].

**Цель исследования.** Анализ результатов исследований функционального поражения подземных коаксиальных КРЛС [1, 2], показал, что максимальные уровни наводок в результате воздействия МЭМИ можно ожидать на внешних металлических оболочках КРЛС. Для многопроводных структур, применяемых в данное время наиболее часто, особенности энергетического воздействия будут иными, в связи с другой конструкцией КРЛС. Поэтому целью данной работы является моделирование функционального поражения подземных многопроводных КРЛС мощными электромагнитными излучениями.

Рассмотрим электромагнитное влияние МЭМИ на подземную многопроводную линию связи, помещенную вглубь земной поверхности. Для определения наводимых МЭМИ токов и напряжений представим структуру представленную на рисунке 1. Данная структура включает в себя внешнюю изоляционную оболочку и внутренние проводники, которые для уменьшения взаимного влияния тоже покрыты изоляцией.

Если кабель включает в себя  $n$  проводников, то методику определения наведенных токов и напряжений в результате воздействия МЭМИ будем проводить из условий, что от земного грунта на ближайший проводник (жилу) будет наведено опасное напряжение. В этом случае данный проводник будем считать влияющей цепью на все остальные  $n - 1$  жилы.

В общем случае напряжения в начале и конце участка воздействия определяются следующим образом [4–6]:

$$\begin{aligned} \dot{U}_n &= \dot{U}_1(0)z_{e2}N_n [1 - \exp(-\gamma_2 l)] / 2\gamma_2; \\ \dot{U}_k &= \dot{U}_1(0)z_{e2}N_k [1 - \exp(-\gamma_2 l)] / 2\gamma_2, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $\dot{U}_1(0)$  – напряжение во влияющей цепи;  $z_{e2}$  – волновое сопротивление цепи, подверженной электромагнитному влиянию;  $\gamma_2$  – постоянная распространения электромагнитных волн в цепи, подверженной влиянию;  $l$  – раскрыт рупора генератора МЭМИ [3, 4];  $N_n = Y_{12} + Z_{12} / z_{e1}z_{e2}$ ,  $N_k = Y_{12} - Z_{12} / z_{e1}z_{e2}$  – коэффициенты, учитывающие влияние индуктивности и емкости между жилами, где  $Y_{12} \approx j\omega C_{12}$  и  $Z_{12} \approx j\omega M_{12}$  – проводимость электрической связи и сопротивление магнитной связи на единицу длины между жилами соответственно;  $C_{12}$  – коэффициент емкостной связи;  $M_{12}$  – взаимная индуктивность.

Поскольку рассматриваемая система не имеет замкнутых контуров, взаимная индуктивность  $M_{12}$  между жилами будет близка к нулю [6]. Кроме того, учитывая, что воздействие происходит на небольшом участке трассы кабеля, определяемом линейными размерами рупора, коэффициент  $N_n = N_k$ . Таким образом, напряжение  $\dot{U}$  в начале и конце участка воздействия будет определяться следующей зависимостью:



$$\dot{U} = \dot{U}_1(0)z_{e2}N[1 - \exp(-\gamma_2 l)] / 2\gamma_2, \quad (2)$$

где  $N \approx j\omega C_{12}$ .

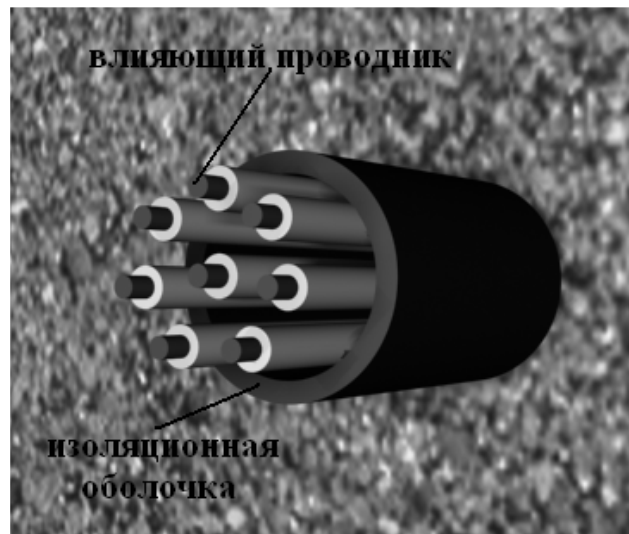


Рисунок 1 – Структура подземной многопроводной линии связи

В этом случае, задача нахождения суммарного напряжения будет сводиться на первом этапе к определению емкостной связи между жилами подземного радиочастотного кабеля [5, 6].

Величина емкости между двумя проводниками зависит не только от их размеров и свойств окружающей среды, но и от наличия соседних проводов.

Определение емкостных связей между жилами осуществляется путем нахождения зависимости между потенциалами и зарядами соседних жил при помощи уравнений Максвелла [6]:

$$\begin{cases} U_1 = 18 \cdot 10^6 (q_1 \alpha_{11} + q_2 \alpha_{12} + q_n \alpha_{1n}) \\ U_2 = 18 \cdot 10^6 (q_1 \alpha_{21} + q_2 \alpha_{22} + q_n \alpha_{2n}) \\ \dots \dots \dots \\ U_n = 18 \cdot 10^6 (q_1 \alpha_{n1} + q_2 \alpha_{n2} + q_n \alpha_{nn}), \end{cases} \quad (3)$$

где  $U_1, U_2, \dots, U_n$  – потенциалы соответствующих жил;  $q_1, q_2, \dots, q_n$  – заряды на жилах;  $\alpha_{11}, \alpha_{12}, \dots, \alpha_{1n}, \alpha_{21}, \dots, \alpha_{nn}$  – коэффициенты, определяемые по формуле:

$$\alpha_{ik} = \alpha_{ki} = \ln \frac{D_{ik}}{\alpha_{ik}}. \quad (4)$$

Здесь  $D_{ik}$  – расстояние между проводником  $i$  и зеркальным изображением проводника  $k$ ,  $\alpha_{ik} = \alpha_{ki}$  – расстояние между проводниками  $i$  и  $k$ . (При  $i = k$ :  $D_{ii}$  – расстояние между проводником и его зеркальным изображением;  $\alpha_{ii}$  – радиус проводника  $i$ ).

Упростим дальнейшее решение системы уравнений и определение емкостей, заменив:

коэффициенты  $\alpha_{12}, \alpha_{13}, \dots, \alpha_{1n}$  – их средним арифметическим значением  $\overline{\alpha_{12}}$ ;

коэффициенты  $\alpha_{22}, \alpha_{33}, \dots, \alpha_{nn}$  – их средним арифметическим значением  $\overline{\alpha_{22}}$ ;

коэффициенты  $\alpha_{23}, \alpha_{34}, \alpha_{24}, \dots, \alpha_{2n}, \alpha_{3n}$  – их средним арифметическим значением  $\overline{\alpha_{23}}$ .

Допустим, что по сравнению с зарядом на влияющем проводнике, заряды всех проводов связи приблизительно одинаковы, т.е.

$$q_2 \approx q_3 \approx q_4 \approx \dots \approx q_n.$$

Таким образом,

$$\begin{cases} \overline{\alpha_{12}} = \frac{1}{n-1}(\alpha_{12} + \alpha_{13} + \alpha_{14} + \dots + \alpha_{1n}) \\ \overline{\alpha_{22}} = \frac{1}{n-1}(\alpha_{22} + \alpha_{33} + \dots + \alpha_{nn}) \\ \overline{\alpha_{23}} = \frac{1}{n-2}(\alpha_{23} + \alpha_{24} + \dots + \alpha_{2n}) = \frac{1}{n-2}(\alpha_{32} + \alpha_{34} + \alpha_{35} + \dots + \alpha_{3n}) = \\ = \frac{1}{n-2}(\alpha_{n2} + \alpha_{n3} + \alpha_{n4} + \dots + \alpha_{n(n-1)}). \end{cases} \quad (5)$$

Подставляя эти выражения в уравнения системы (3), получим:

$$\begin{cases} U_1 = 18 \cdot 10^6 (q_1 \alpha_{11} + (n-1) q_2 \overline{\alpha_{12}}) \\ U_2 = 18 \cdot 10^6 \{ q_1 \overline{\alpha_{12}} + q_2 [\overline{\alpha_{22}} + (n-2) \overline{\alpha_{23}}] \} \\ \dots \dots \dots \\ U_n = 18 \cdot 10^6 \{ q_1 \overline{\alpha_{12}} + q_2 [\overline{\alpha_{22}} + (n-2) \overline{\alpha_{23}}] \}. \end{cases} \quad (6)$$

Из системы уравнений (6) видно, что  $U_2 = U_3 = \dots = U_n$ .

Далее из первого уравнения системы (6) получаем

$$q_1 = \frac{U_1 - 18 \cdot 10^6 q_2 (n-1) \overline{\alpha_{12}}}{18 \cdot 10^6 \alpha_{11}}.$$

Подставив во второе уравнение системы (6) значение  $q_1$  и пренебрегая членом, содержащим  $\overline{\alpha_{12}^2}$ , получим:

$$q_2 = \frac{1}{18 \cdot 10^6} \left[ \frac{\alpha_{11}}{\alpha_{11} \overline{\alpha_{22}} + (n-2) \overline{\alpha_{23}} \alpha_{11}} U_2 - \frac{\overline{\alpha_{12}}}{\alpha_{11} \overline{\alpha_{22}} + (n-2) \overline{\alpha_{23}} \alpha_{11}} U_1 \right]. \quad (7)$$

Подставим это значение  $q_1$  в первое уравнение системы (6):

$$U_1 = 18 \cdot 10^6 q_1 \alpha_{11} + \frac{(n-1) \overline{\alpha_{12}} \alpha_{11}}{\alpha_{11} \overline{\alpha_{22}} + (n-2) \overline{\alpha_{23}} \alpha_{11}} U_2 - \frac{(n-1) \overline{\alpha_{12}^2}}{\alpha_{11} \overline{\alpha_{22}} + (n-2) \overline{\alpha_{23}} \alpha_{11}} U_1. \quad (8)$$

Пренебрегая членом, содержащим  $\overline{\alpha_{12}^2}$ , получим:

$$q_1 = \frac{1}{18 \cdot 10^6} \left[ \frac{1}{\alpha_{11}} U_1 - \frac{(n-1) \overline{\alpha_{12}}}{\alpha_{11} \overline{\alpha_{22}} + (n-2) \overline{\alpha_{23}} \alpha_{11}} U_2 \right]. \quad (9)$$

Перепишем выражения (9) и (7) в следующем виде:

$$\begin{cases} q_1 = k_{11}U_1 + (n-1)k_{12}U_2, \\ q_2 = k_{12}U_1 + k_{22}U_2 \end{cases}, \quad (10)$$

где  $k_{11} = \frac{1}{18 \cdot 10^6 \alpha_{11}}$ ,  $k_{22} = \frac{\alpha_{11}}{18 \cdot 10^6 [\alpha_{11} \overline{\alpha_{22}} + (n-2) \overline{\alpha_{23} \alpha_{11}}]}$ ,  $k_{12} = -\frac{\overline{\alpha_{12}}}{18 \cdot 10^6 [\alpha_{11} \overline{\alpha_{22}} + (n-2) \overline{\alpha_{23} \alpha_{11}}]}$ .

Выразим правые части уравнений системы (10) через частичные емкости:

$$\begin{cases} q_1 = C_{11}U_1 + (n-1)C_{12}(U_1 - U_2) \\ q_2 = C_{22}U_2 + C_{12}(U_2 - U_1) + (n-2)C_{23}(U_2 - U_3) \end{cases}. \quad (11)$$

Здесь  $C_{11}$  представляет ту часть общего заряда системы пучка проводов, которая приходится на долю первого провода, когда все провода соединены между собой и им сообщены потенциалы, равные единице, то есть ту часть общей емкости всех проводов, которая обусловлена присутствием первого провода в данном пучке проводов (все остальные провода соединены между собой). Аналогичную величину представляет и  $C_{22}$ .

Величина  $C_{12}$  представляет частичную (взаимную) емкость между первым и каждым последующим проводом пучка. Величина  $C_{23}$  представляет частичную (взаимную) емкость между вторым и каждым последующим проводом.

Так как  $U_2 = U_3 = \dots = U_n$ , то уравнения системы (11) можно привести к следующему виду:

$$\begin{cases} q_1 = [C_{11} + (n-1)C_{12}]U_1 - (n-1)C_{12}U_2 \\ q_2 = (C_{12} + C_{22})U_2 - C_{12}U_1 \end{cases}. \quad (12)$$

Из сравнений уравнений (10) и (12) видно, что

$$k_{11} = C_{11} + (n-1)C_{12}; \quad k_{12} = -C_{12}; \quad k_{22} = C_{12} + C_{22}. \quad (13)$$

Из равенств (13) следует, что  $C_{12} = -k_{12}$ . После подстановки принятого ранее выражения для  $k_{12}$ , получаем, что взаимная емкость между первым и каждым последующим проводом пучка будет определяться из следующего выражения:

$$C_{12} = \frac{\overline{\alpha_{12}}}{18 \cdot 10^6 [\alpha_{11} \overline{\alpha_{22}} + (n-2) \overline{\alpha_{23} \alpha_{11}}]}. \quad (14)$$

Подставив уравнение (14) в (2), получаем:

$$\dot{U} = \dot{U}_1(0) z_{e2} j \omega \frac{\overline{\alpha_{12}}}{18 \cdot 10^6 [\alpha_{11} \overline{\alpha_{22}} + (n-2) \overline{\alpha_{23} \alpha_{11}}]} [1 - \exp(-\gamma_2 l)] / 2 \gamma_2. \quad (15)$$

Определим напряжение во влияющей цепи  $\dot{U}_1(0)$ . Как было сказано выше, влияющей цепью следует считать жилу, являющуюся ближайшей к проводящей оболочке кабеля при воздействии на него МЭМИ.

Экспериментально установлено, что спектральная плотность излучаемого источником МЭМИ воздействия может иметь вид [3, 4]:

$$U_0(j\omega) = \frac{\omega_n}{(a + j\omega_n)^2 + \omega_n^2}. \quad (16)$$

Выражение для тока, протекающего во влияющей цепи, можно записать следующим образом [2]:

$$i = \frac{\dot{U}_o h^2 \sigma_{31} F(h_1 \sqrt{\frac{10\sigma_{31}\omega}{2\pi}})}{2lr_l} \sqrt{\frac{\omega\mu_1 h}{Z_{u3} k_1}} \alpha e^{i\left(\varphi - \frac{\pi}{4}\right)}$$

или, учитывая (16):

$$i = \frac{\omega_n}{(a + j\omega_n)^2 + \omega_n^2} \frac{h^2 \sigma_{31} F(h_1 \sqrt{\frac{10\sigma_{31}\omega}{2\pi}})}{2lr_l} \sqrt{\frac{\omega\mu_1 h}{Z_{u3} k_1}} \alpha e^{j\left(\varphi - \frac{\pi}{4}\right)}, \quad (17)$$

где  $h$  – глубина расположения кабеля в земном грунте;  $l$  – длина отрезка кабеля подверженного влиянию МЭМИ;  $r_l$  – радиус жилы;  $\sigma_{31}$  – удельная проводимость верхнего горизонтального слоя грунта;  $F(h_1 \sqrt{\frac{10\sigma_{31}\omega}{2\pi}})$  – зависимость между удельной проводимостью верхнего горизонтального слоя  $\sigma_{31}$  и общей удельной проводимостью земли  $\sigma_3$  при известной глубине залегания верхнего слоя грунта  $h_1$  и частоте  $f$  воздействующего излучения;  $Z_{u3}$  – сопротивление изоляции жилы;  $\mu_1$  – магнитная проницаемость оболочки жилы;  $k_1 = \sqrt{\omega\mu_1\sigma_1}$  – коэффициент.

Следовательно, напряжение во влияющей цепи определяется выражением:

$$\dot{U} = \frac{\omega}{(a + j\omega)^2 + \omega^2} \frac{h^2 \sigma_{31} F(h_1 \sqrt{\frac{10\sigma_{31}\omega}{2\pi}})}{2lr_l z_{e1}} \sqrt{\frac{\omega\mu_1 h}{Z_{u3} k_1}} \alpha e^{j\left(\varphi - \frac{\pi}{4}\right)}. \quad (18)$$

Считая, что волновые сопротивления всех жил кабеля одинаковы, т.е.  $z_{e1} = z_{e2} = \dots = z_{en}$ , запишем выражение для нахождения суммарного напряжения:

$$\begin{aligned} \dot{U} = & \frac{\omega}{(a + j\omega)^2 + \omega^2} \frac{U_m h^2 \sigma_{31} F(h_1 \sqrt{\frac{10\sigma_{31}\omega}{2\pi}})}{2lr_l z_{e2}} \sqrt{\frac{\omega\mu_1 h}{Z_{u3} k_1}} \alpha e^{j\left(\varphi - \frac{\pi}{4}\right)} \times \\ & \times j\omega \frac{\overline{\alpha_{12}}}{18 \cdot 10^6 [\overline{\alpha_{11}\alpha_{22}} + (n-2)\overline{\alpha_{23}\alpha_{11}}]} [1 - \exp(-\gamma_2 l)] / 2\gamma_2 \end{aligned} \quad (19)$$

Или

$$\begin{aligned} U(t) = & e^{-at} \left[ \omega \cos(\omega_n t) - a \sin(\omega t) - \omega_n \left( \frac{\varphi}{2} - \frac{\pi}{8} \right) \sin(\omega t) \right] \sqrt{\frac{\omega\mu_1 h \alpha}{Z_{u3} k_1}} \times \\ & \times \frac{U_m h^2 \sigma_{31} F(h_1 \sqrt{\frac{10\sigma_{31}\omega}{2\pi}})}{2lr_l z_{e2}} \frac{\overline{\alpha_{12}}}{18 \cdot 10^6 [\overline{\alpha_{11}\alpha_{22}} + (n-2)\overline{\alpha_{23}\alpha_{11}}]} \frac{1 - e^{-\gamma_2 l}}{2\gamma_2} \end{aligned} \quad (20)$$

Найдем энергию, выделяющуюся на диэлектрических компонентах кабеля при воздействии МЭМИ:

$$W = \int_0^{\tau} \frac{U^2(t)}{R_n} dt, \quad (21)$$

где  $R_n = \frac{\rho_{uz} \cdot l}{S_c}$ .

Подставив выражение (20) в (21) и произведя интегрирование, получим:

$$W = \left[ \frac{U_m^2 h^5 \sigma_{31}^2 F^2 (h_1 \sqrt{\frac{10 \sigma_{31} \omega}{2\pi}})}{4l^2 r_l^2 z_{\theta 2}^2} \frac{\overline{\alpha_{12}^2}}{(18 \cdot 10^6 [\alpha_{11} \overline{\alpha_{22}} + (n-2) \overline{\alpha_{23} \alpha_{11}}])^2} \right] \times \quad (22)$$

$$\times \frac{\omega \mu_1 \alpha [1 - e^{-\gamma_2 l}]^2}{Z_{uz} k_1 4 \gamma_2^2 R_n} \left[ \begin{aligned} &\omega^2 a^2 \cos(2\omega\tau) - \omega^3 a \sin(2\omega\tau) + \omega^2 a^2 + \\ &+ \omega^4 - 2\omega^2 \left[ a - \omega \left( \frac{\phi}{2} - \frac{\pi}{8} \right) \right] a^2 \sin(2\omega\tau) + \\ &+ a^2 + \omega^2 - a^2 \cos(2\omega\tau) + (\omega \sin(2\omega\tau) a) - \\ &- 2\omega^2 a^2 - \omega^4 + 2\omega^2 \left[ a - \omega \left( \frac{\phi}{2} - \frac{\pi}{8} \right) \right] a \end{aligned} \right]$$

Выражение (22) позволяет определять энергию, выделяемую на диэлектрических компонентах многожильного кабеля при воздействии на него МЭМИ. На рисунке 2 представлена графическая зависимость энергии, выделяемой на диэлектрических компонентах 8-ми жильного кабеля, находящегося в земном грунте на глубине 3 метра, от напряжения на генераторе МЭМИ.

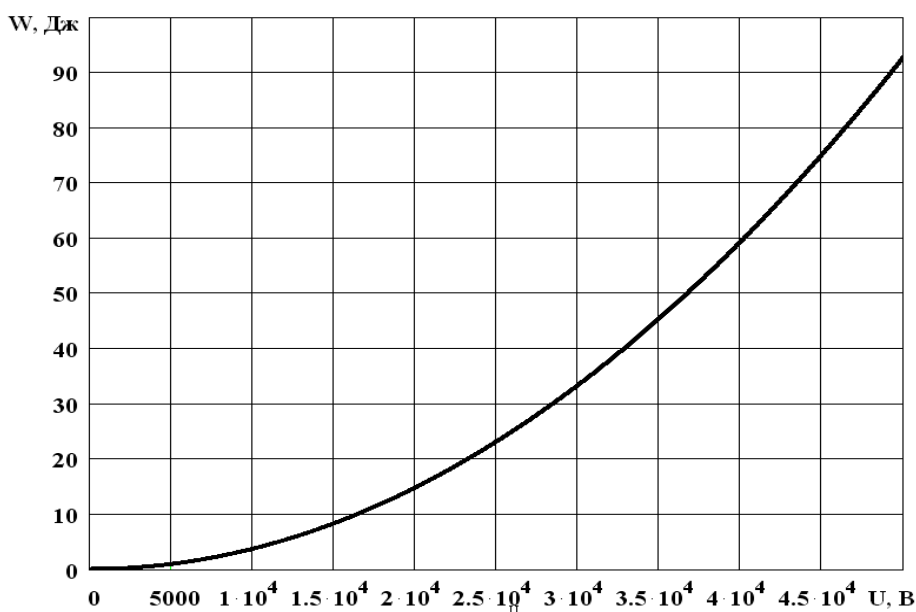


Рисунок 2 – Зависимость энергии, выделяющейся на диэлектрических компонентах многожильного кабеля, от напряжения на генераторе

**Выводы.** Таким образом, при воздействии МЭМИ на многопроводные КРЛС, достаточно большие уровни энергии выделяются на его диэлектрических элементах (см. рисунок 1). Это может приводить к локальному плавлению диэлектрических материалов, из-за невозможности отвода тепла в области нагрева кабеля [2, 5, 6], что неизменно приведет во всей линии связи к ухудшению её электрических свойств, которые неразрывно связаны с определением функционального поражения систем связи.

Литература

1. Кучер Д.Б. Мощные электромагнитные излучения и сверхпроводящие устройства / Д.Б. Кучер. – С.: 1997. – 188 с.
2. Кучер Д.Б. Особенности функционального поражения подземных радиочастотных линий связи мощными электромагнитными излучениями / Д.Б. Кучер, А.И. Харланов, И.В. Медведь, Л.В. Литвиненко // МРФ-2008. – Харьков, 2008. – Том 6. – С. 175–181.
3. Гладков В.С. Генераторы наносекундных импульсов напряжения амплитудой до 5 Мв / В.С. Гладков, А.А. Гученко, П.Н. Мельников, А.В. Шестериков // МРФ-2005. – Харьков, 2005. – С. 84–87.
4. Чумаков В.И. Параллельная кумуляция на основе многолайнерных систем / В.И. Чумаков, А.В. Столярчук // ННЦ ХФТИ. Вопросы атомной науки и техники. Сер. «Плазменная электроника и новые методы ускорения» – Харьков -2006. – №5 – С. 235–239.
5. Ефимов И.Е. Радиочастотные линии передачи / И.Е. Ефимов. – М.: 1964. – 599 с.
6. Михайлов М.И. Влияние внешних электромагнитных полей на цепи проводной связи и защитные мероприятия / М.И. Михайлов. – М.: Связьиздат, 1959. – 583 с.

Bibliography (transliterated)

1. Kucher D.B. Moshhnye jelektromagnitnye izlucheniya i sverhprovodjashhie ustrojstva D.B. Kucher. – S.: 1997. – 188 p.
2. Kucher D.B. Osobennosti funkcional'nogo porazhenija podzemnyh radiochastotnyh linij svja-zi moshhnyimi jelektromagnitnymi izluchenijami D.B. Kucher, A.I. Harlanov, I.V. Medved', L.V. Litvi-nenko MRF-2008. – Har'kov, 2008. – Tom 6. – p. 175–181.
3. Gladkov V.S. Generatory nanosekundnyh impul'sov naprjazhenija amplitudoj do 5 Mv V.S. Gladkov, A.A. Guchenko, P.N. Mel'nikov, A.V. Shesterikov MRF-2005. – Har'kov, 2005. – p. 84–87.
4. Chumakov V.I. Parallel'naja kumuljacija na osnove mnogolajnernyh sistem V.I. Chumakov, A.V. Stoljarchuk NNC HFTI. Voprosy atomnoj nauki i tehnik. Ser. «Plazmennaja jelektronika i novye metody uskorenija» – Har'kov -2006. – #5 – p. 235–239.
5. Efimov I.E. Radiochastotnye linii peredachi I.E. Efimov. – M.: 1964. – 599 p.
6. Mihajlov M.I. Vlijanie vneshnih jelektromagnitnyh polej na cepi provodnoj svjazi i zashhitnye meroprijatija M.I. Mihajlov. – M.: Svjaz'izdat, 1959. – 583 p.

УДК 621.373.7

Кучер Д.Б., Харланов О.И., Медведь И.В., Литвиненко Л.В., Корощенко М.М.

**МОДЕЛЬ ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ ПОРАЗКИ ПІДЗЕМНИХ БАГАТОДРОТОВИХ РАДІОЧАСТОТНИХ ЛІНІЙ ЗВ'ЯЗКУ ПОТУЖНИМИ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИМИ ВИПРОМІНЮВАННЯМИ**

В роботі представлена математична модель впливу потужних електромагнітних випромінювань на підземні багатодротові радіочастотні кабельні лінії зв'язку. Також розглянуті питання взаємних впливів дротів між собою, як складових ліній зв'язку, та приведені результати розрахунків енергії, що буде виділятися на діелектричних матеріалах в залежності від рівнів напруг потужних електромагнітних випромінювань, що впливають.

Kucher D.B., Kharlanov O.I., Medved I.V., Litvinenko L.V., Koroshchenko M.M.

**THE MODEL OF FUNCTIONAL INJURY OF MULTIWIRED RADIOFREQUENCY COMMUNICATIONS WITH STRONG ELECTROMAGNETIC RADIATIONS**

The mathematical model of strong electromagnetic radiation influence on underground multiwired radiofrequency cable communication is presented. The problem of mutual interaction of wires is discussed too. As well as results of calculations of energy discharged on dielectric materials according to levels of voltages of strong electromagnetic radiations.

**О ЗАДАНИИ ОГРАНИЧЕНИЙ В ЗАДАЧЕ ОПТИМИЗАЦИИ СИСТЕМЫ УТИЛИЗАЦИИ  
ВТОРИЧНОГО ГИДРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО РЕСУРСА**

**Актуальность проблемы.** Количественная оценка потенциала возможной утилизации вторичного гидроэнергетического ресурса [1,2] показывает, что объёмов последнего на промышленных предприятиях достаточно для частичной компенсации покупаемой электроэнергии. Однако, для увеличения КПД утилизации механической энергии потоков воды от элементов технологического оборудования необходимо решить ряд технических и методологических задач. Основной и наиболее сложной из них является создание оптимальной системы сбора этих потоков.

**Постановка задачи.** Эффективность рассматриваемой утилизации напрямую зависит от топологии системы сбора технической воды. Как известно, производственное оборудование имеет различные габаритные размеры и, обусловленное технологическим процессом, расположение по территории предприятия (цеха). При постановке задачи оптимизации топологии указанной системы сбора возникают сложности, связанные с математической формулировкой ограничений на места возможного расположения её элементов. В зависимости от того, каким образом внесены эти ограничения, сложность решения поставленной задачи существенно меняется.

В [3] предложен близкий по постановке метод решения топологической задачи применительно к электрическим сетям. Однако он не позволяет учесть некоторые физико-технические особенности создаваемой системы сбора гидроресурса (ССГ). Так, в указанной работе топологическая задача рассматривается с позиции имитационно-детерминированного моделирования. При этом, моделируя места расположения узлов нагрузки в плане сети рекомендуется отождествлять их с граничными точками дуг концентрических окружностей, центры которых имеют некоторые условные координаты  $(x_0, y_0)$ . Этот, так называемый центр электрической нагрузки, как бы представляет собой метрический базис моделирования и задается предварительно, либо вычисляется по определенному правилу.

Сложность и нецелесообразность предложенной в [3] постановки и решения рассматриваемой топологической задачи в контексте проектирования рациональных систем сбора очевидна. Но, на первый взгляд, довольно проблематичным остаётся вопрос задания множества  $N_i$  координат всех точек  $i$ -ой зоны недопустимого расположения ССГ. В математическом плане наложение указанного ограничения на маршруты пролегания трасс и расположения центров сбора технической воды относится к так называемому распознаванию «образов» (недопустимых зон) и предусматривает формирование их разделяющих функций, что не менее проблематично.

В общем виде координаты размещения оборудования системы сбора вторичного гидроэнергетического ресурса  $(x_C, y_C, z_C)$ , расположение которых недопустимо с точки зрения территориальных ограничений, задаются следующим образом [4]:

$$(x_C, y_C, z_C) \notin N_i, \quad i = \overline{1, H}, \quad (1)$$

где  $N_i$  – множество координат всех точек пространства, которые принадлежат  $i$ -ой замкнутой зоне недопустимого размещения ССГ;  $H$  – количество недопустимых зон на территории предприятия (цеха).

При этом существенное упрощение задачи может быть достигнуто при использовании методов распознавания, в соответствии с которыми предусматривается разбиение пространства «образа» на непересекающиеся области, каждая из которых соответствует изображению одного и того же класса, допускающего элементарное аналитическое описание.

В указанном случае вся недопустимая зона опишется чисто логической разделяющей функцией вида:

$$\vec{\psi}(x) = \bigvee_{\mu=1}^m \varphi_{\mu}(\vec{x}), \quad (2)$$

где  $m$  – число непересекающихся областей, на которые разбит «образ»;  $\varphi_{\mu}(\vec{x})$  – аналитическое описание области выбранного класса.

Очевидно, что приемлемой для рассматриваемой нами задачи является элементарная область в виде параллелепипеда, наиболее простое аналитическое описание которой представляет собой сигнатурную функцию вида [5]:

$$\varphi_{\mu}(\vec{x}_j) = \frac{1}{2^n} \prod_{\gamma=1}^n \{1 + \text{sgn} [(x_{j\gamma} - x_{\mu\gamma\min})(x_{\mu\gamma\max} - x_{j\gamma})]\} \quad (3)$$

Если рассматриваемая ситуация  $x_j$  (предполагаемое место расположения  $j$ -го оборудования ССГ) входит в параллелепипед  $(x_{\gamma\min} \dots x_{\gamma\max}, \gamma = \overline{1, n})$ , то  $\varphi_{\mu}(\vec{x}_j) = 1$ . В противоположном случае  $\varphi_{\mu}(\vec{x}_j) = 0$ . Очевидно, что размерность рассматриваемого пространства образа в данном случае  $n = 3$  (ширина, длина и высота технологического оборудования.)

В качестве примера на рисунке 1 показана условная зона недопустимого расположения ССГ на плане реального промышленного предприятия (цеха графитации ОАО «Укрграфит») [2]. В математическом плане она представляет собой множество значений  $x_{\mu\gamma\min}, x_{\mu\gamma\max}$ , последовательно подставляемых в формулу (3). Предварительно в эту формулу вносятся значения координат предполагаемого места расположения ССГ  $\vec{x}_j = \{x_{j1}, x_{j2}, x_{j3}\}$ . В виде параллелепипеда условно изображен один из видов технологического оборудования, а именно, электрокальцинатор, положение которого на трёхмерном плане цеха ограничивается координатами пространства  $x_{j1} (5 \dots 12)$ ;  $x_{j2} (20 \dots 27)$ ;  $x_{j3} (0 \dots 17)$ , м, и, по сути, является зоной недопустимого расположения ССГ. Допустим, предполагаемые точки, в которых находится оборудование системы сбора имеют координаты  $x_{ja} (5; 5; 5)$  и  $x_{jb} (7; 25; 10)$ , м. Подставляя исходные данные поочередно в формулу получим:  $\varphi(x_{ja}) = 0$  и, соответственно,  $\varphi(x_{jb}) = 1$ . Это означает, что т. а является допустимой координатой размещения элементов рассматриваемой системы утилизации, а, соответственно, т. б таковой не является.

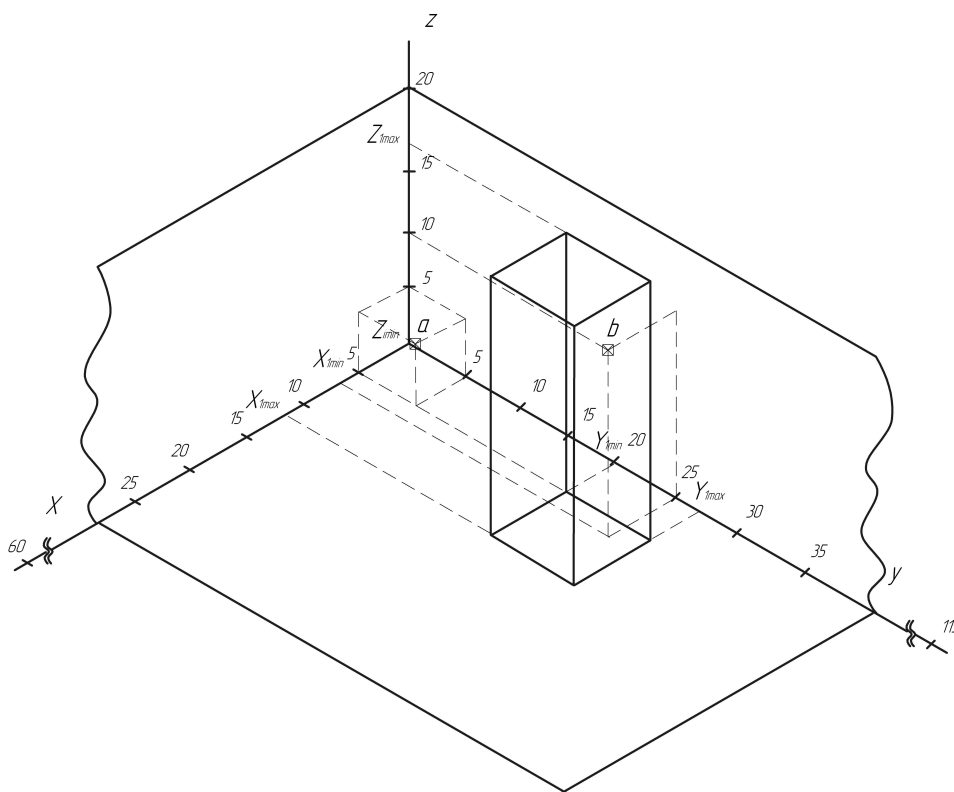


Рисунок 1 – Иллюстрация расположения элементов ССГ и технологического оборудования на плане цеха промышленного предприятия



Очевидно, что предложенный метод наложения ограничений на места расположения элементов системы сбора существенно упрощает её синтез и позволяет получить координаты расположения элементов ССГ без постановки собственно громоздких и сложных топологических задач.

**Выводы.** Аналитическое описание зоны недопустимого расположения оборудования ССГ на территории промышленного предприятия (цеха) предлагается выполнить на основе методов распознавания «образов» с использованием сигнатурной функции. Такой подход позволит упростить решение задачи оптимизации системы сбора технической воды с учетом наложенных ограничений.

### Литература

1. Качан Ю.Г., Коваленко В.Л. О возможности повышения эффективности утилизации вторичных энергоресурсов промышленных предприятий // Вісник ДонНТУ. Серія: «Екологія». – 2008. – № 1(143). – С. 54–56.
2. Качан Ю.Г., Коваленко В.Л., Филобок А.А. Оценка потенциала утилизации вторичного гидроэнергетического ресурса на примере металлургического предприятия // Металургія: Наукові праці ЗДІА. – 2009. – Вип.19. – С. 23–25.
3. Skorobogatova V.I., D'yachenko V.V. Метод решения топологической задачи применительно к электрическим сетям // Электрический журнал. – 1996. – №1(3). – С. 34–37.
4. Качан Ю.Г., Дьяченко В.В. Методические основы повышения энергоэффективности систем электроснабжения промышленных предприятий // Гірнична електромеханіка та автоматика: Наук.-техн.зб. – 2006. – Вип.76. – С. 12–17.
5. Воронов В.А. Метод описания технологических ситуаций и его использование при управлении процессами // Обогащение руд: Наук.-техн. інформ. зб. – 1982. – №2. – С. 31–35.

### Bibliography (transliterated)

1. Kachan Ju.G., Kovalenko V.L. O vozmozhnosti povysheniya jeffektivnosti utilizacii vtorich-nyh jenergoresursov promyshlennyh predpriyatij // Visnik DonNTU. Serija: «Ekologija». – 2008. – # 1(143). – p. 54–56.
2. Kachan Ju.G., Kovalenko V.L., Filobok A.A. Ocenka potenciala utilizacii vtorichnogo gidrojenergeticheskogo resursa na primere metallurgicheskogo predpriyatija // Metalurgija: Naukovi praci ZDIA. – 2009. – Vip.19. – p. 23–25.
3. Skorobogatova V.I., D'yachenko V.V. Metod reshenija topologicheskoi zadachi primenitel'no k jelektricheskim setjam // Elektrichnij zhurnal. – 1996. – #1(3). – p. 34–37.
4. Kachan Ju.G., D'yachenko V.V. Metodicheskie osnovy povysheniya jenergojeffektivnosti sistem jelektrosnabzhenija promyshlennyh predpriyatij // Girnichna elektromehaniika ta avtomatika: Nauk.-tehn.zb. – 2006. – Vip.76. – p. 12–17.
5. Voronov V.A. Metod opisaniija tehnologicheskikh situacij i ego ispol'zovanie pri upravlenii procesami // Obogashhenie rud: Nauk.-tehn. inform. zb. – 1982. – #2. – p. 31–35.

УДК 621.311.16

Качан Ю.Г., Коваленко В.Л.

### ПРО ЗАДАННЯ ОБМЕЖЕНЬ У ЗАДАЧІ ОПТИМІЗАЦІЇ СИСТЕМИ УТИЛІЗАЦІЇ ВТОРИННОГО ГІДРОЕНЕРГЕТИЧНОГО РЕСУРСУ

У статті пропонується застосувати метод розпізнавання «образів» для внесення обмежень (недопустимих зон) на місця розташування елементів системи збору вторинного гідроенергетичного ресурсу підприємств. В математичному плані накладення обмежень пропонується виконувати шляхом формування розділяючої функції «образа», найбільш просте аналітичне описання якої в данному випадку представляє собою сигнатурну функцію. Запропонований підхід дозволить спростити вирішення задачі оптимізації системи збору без постановки складних топологічних задач.

Kachan Y., Kovalenko V.

**ABOUT PUTTING IN LIMITS IN THE TASK OF OPTIMIZATION THE SYSTEM OF SECONDARY HYDROENERGETIC RESOURCE**

To apply the method of «pattern» recognition for putting in limits (forbidden zones) on the places of elements' location in a system of secondary hydroenergetic plants resource collection is proposed in this article. In math meaning the forbidden zones are proposed to make by forming a dividing function «pattern». Its simplest analytical description is a signature function in our case. In offered approach will help to solve and simplify the task of optimization the system of collection without solving hard topologies tasks.

УДК 678.073.002

Бухкало С.И., Ольховская О.И, Борхович А.А., Лазарева Т.А.

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ОПТИМИЗАЦИИ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ**

При постановке задачи в данном случае решения задачи энергосбережения, прежде всего, следует отметить, что исследования многих авторов показывают – наращивание мировых темпов выпуска полимерных изделий и это происходит при практическом отсутствии украинского рынка производства полимерного сырья, что и обуславливает специфическую структуру затрат при производстве полимеров – 77,6 % составляют материальные затраты (рис. 1).

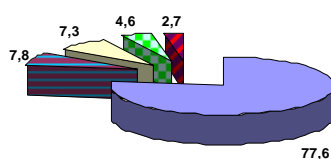


Рисунок 1 – Распределение затрат при производстве полимеров, %: 77,6 – материальные затраты; 7,8 – оплата труда; 7,3 – иные операционные затраты; 4,6 – амортизация; 2,7 – отчисления на социальные мероприятия

**Актуальность проблемы.** Актуальность проводимых исследований подтверждает тот факт, что уровень использования отходов на постсоветском пространстве уже длительное время остается в среднем не выше одной трети, а уровень повторной переработки полимерных материалов составляет не более 6–8 %. Такая ситуация, прежде всего, обусловлена отсутствием научного подхода к сбору и переработке бывших в употреблении полимерных изделий. Большинство участников процессов переработки полимерного сырья в изделия не учитывает затраты энергии на производство пластмасс (табл. 1) и другие несомненно важные аспекты этой проблемы.

Таблица 1 – Потребление энергии (кВтч/т) для производства пластмасс

Пластмассы	Общая энергия		Энергия для полимеризации	Энергетический эквивалент	Энтальпия горения
Полиэтилен высокой плотности	13,670	8,840	10,110	20,850	12,010
Полиэтилен низкой плотности	8,187	6,830	4,600	18,900	12,070
Полипропилен	8,240	8,070	4,700	20,020	11,950

**Цель работы.** Была проведена оценка возможностей предполагаемой разработки с целью внедрения на производстве с учетом материальных и энергетических ценностей, заключенных в использованной упаковке. Выявлено, что относительно небольшие затраты на переработку использованной полимерной упаковки, предопределяют существенную экономию средств за счет использования вторичного полимерного сырья.

В настоящее время нет четкой классификации полимерных отходов с учетом нового, быстро развивающегося рынка. Необходимо разработать методы контроля изменения свойств в процессе эксплуатации различных видов полимеров и с помощью математического моделирования на ЭВМ оптимизировать процессы их модификации. Это позволит разработать технологические регламенты для многократного использования полимеров, так как сейчас самое популярное решение их утилизации – на свалку, количество которых вокруг украинских городов неуклонно растет. Только комбинация нескольких взаимосвязанных мероприятий по разработке методов сбора различных видов полимерных отходов и выбору научно обоснованных методов их использования, а, следовательно, выбора метода переработки или утилизации может способствовать эффективному решению проблемы отходов.

Из известных методов использования полимерных отходов, на наш взгляд, наиболее перспективными с точки зрения энерго- и ресурсосбережения является направление получения доброкачествен-

ных изделий из вторичных полимеров, в частности из изношенной полиэтиленовой пленки [1, 2]. Это позволяет расширить сырьевую базу для производства изделий и повысить эффективность использования сырья с учетом свойств отходов различного происхождения, их состава и возможности организованного сбора.

Обеспечение качества изделий из вторичных полимеров – одна из основных целей предприятий их выпускающих. Качество изделий из вторичных полимеров может быть оценено по изменению физико-химических и физико-механических свойств, молекулярной массе полимера и целому ряду других свойств.

При эксплуатации полиэтиленовой пленки в течение трех месяцев ухудшаются её технологические качества. После четырех месяцев эксплуатации наблюдается, разрушение материала, которое сопровождается резким падением прочности, уменьшением молекулярной массы и разрушением некоторой части гельфракции за счет более глубоких процессов окисления [3]. Следовательно, полимерные изделия, эксплуатировавшиеся в жестких условиях, например, пленка сельскохозяйственного назначения, требуют введения модифицирующих добавок в процессе повторной переработки.

Основной целью исследований являлось изучение влияния технологических параметров и концентрации перекиси дикумила на количество гельфракции и прочностные характеристики литьевых образцов модифицированного вторичного полиэтилена.

Варьирование параметров процесса: увеличение концентрации перекиси, уменьшение температуры литья и длительности охлаждения создают предпосылки для увеличения в композиции сшитой части, что приводит к смещению температуры текучести и размягчения в область более высоких температур. Это подтверждается ростом содержания гельфракции и меньшей склонностью материала к деструкции в этих условиях переработки.

Для проведенного нами процесса модификации вторичного полиэтилена была разработана математическая модель с целью изучения влияния технологических параметров и концентрации перекиси дикумила на прочность литьевых образцов и содержание гельфракции. В число влияющих факторов были включены температура литья  $T(X1)$ , длительность цикла литья  $\tau(X2)$  и концентрация перекиси дикумила  $C(X3)$ . Из результатов проведенных нами экспериментов следует, что модификацию вторичного полиэтилена перекисью дикумила в процессе литья под давлением необходимо проводить в температурном интервале 170–210 °С в течение 65–85 с и при концентрации перекиси дикумила 0,1–0,4 %.

Последующая обработка опытных данных с целью получения уравнения регрессии, адекватно описывающего исследуемый процесс, произведена на ЭВМ. Для реализации опытов по избранному плану было проведено определение интервалов варьирования и кодирование переменных (табл. 2).

Таблица 2 – Результаты варьирования переменных

Влияющий фактор	Условное обозначение	Диапазон изменения	Нулевой уровень	Интервал варьирования
T °С	X1	170–210	$X_{10} = \frac{170+210}{2} = 190$	$\Delta X_1 = \frac{210-170}{2} = 20$
$\tau$ (с)	X2	65–85	$X_{20} = \frac{65+85}{2} = 75$	$\Delta X_2 = \frac{85-65}{2} = 10$
C (%)	X3	0,1–1,4	$X_{30} = \frac{0,1+0,4}{2} = 0,25$	$\Delta X_3 = \frac{0,4-0,1}{2} = 0,15$

В результате обработки опытных данных получены уравнения регрессии, адекватно описывающее процесс модификации вторичного полиэтилена соответственно для трех Y – относительное удлинение при разрыве; прочность при растяжении и количество гельфракции:

$$Y = 70,14 + 2,91X_1 - 3,08X_3 + 1,09X_1X_3 - 2,21X_1X_2X_3;$$

$$Y = 15,21 - 0,365 X_1X_2X_3;$$

$$Y = 49,65 - 4,32X_1 - 4,48X_2 + 1,99X_3 - 3,41X_1X_2.$$

Максимальный показатель относительного удлинения при разрыве для процесса модификации вторичного полиэтилена перекисью дикумила можно получить исходя из вышеприведенного уравнения

регресии при переработке его при максимальной температуре и концентрации перекиси, минимальной длительности цикла литья.

Проведенные эксперименты и выведенное уравнение регрессии для процесса модификации вторичного полиэтилена перекисью дикумила при литье под давлением указывает на его большую чувствительность к длительности цикла литья, температурному воздействию и в меньшей степени, для данных концентраций перекиси, количеству перекиси.

Максимальное содержание геля фракции для процесса модификации вторичного полиэтилена перекисью дикумила можно получить исходя из вида нижеприведенного уравнения регрессии при переработке его при минимальных температуре и длительности цикла литья и максимальной концентрации перекиси дикумила.

Исследования выявили, что вышеуказанные факторы оказывают незначительное влияние на относительное удлинение при разрыве образцов модифицированного материала. Вероятно, при введении перекиси дикумила снижается влияние температуры и времени на относительное удлинение при разрыве отлитых образцов в данном интервале варьирования факторов. Знаки при членах уравнения соответствуют установившимся представлениям о роли основных факторов при модификации, а абсолютные значения коэффициентов регрессии указывают на вклад каждого из членов в формирование величины переменной состояния  $Y$ .

Для удобства практического использования полученной зависимости с помощью формулы кодирования путем обратного перехода к натуральным переменным получили соответственно для каждой исследуемой модели следующие уравнения регрессии:

$$Y = 80,34 - 0,03T - 3,52\tau - 1142,9 C + 0,019T \cdot \tau + 5,92T \cdot C + 14,1\tau \cdot C - 0,074T \cdot \tau \cdot C ;$$

$$Y = -15,21 - 0,23T - 0,58\tau - 173,85 C + 0,003T \cdot \tau + 0,91 T \cdot C + 2,32\tau \cdot C - 0,012 T \cdot \tau \cdot C ;$$

$$Y = -122,0425 + 1,0627T + 2,7915\tau + 13,267 C - 0,017T \cdot \tau .$$

Полученные данные обрабатывали на ЭВМ в среде статистического пакета STATISTICA 6.0 и EXCEL с целью их графической интерпретации и смыслового анализа (рис. 2).

**Выводы.** В результате проведенных работ можно сделать выводы о том, что вводимые во вторичные полимеры модифицирующие добавки корректируют приобретенные в результате эксплуатации свойства и облегчают их переработку. То есть функция вводимых ингредиентов для вторичных полимеров несколько иная, чем для первичных полимеров – это научно обоснованная коррекция свойств новых материалов с учетом условий и сроков предыдущей эксплуатации. Для достижения этих целей разработана система обеспечения качества, которая базируется на научном и производственном опыте, а также современных методах математического моделирования.

Таким образом, из перечисленных методов использования полимерных отходов, наиболее перспективным с точки зрения ресурсосбережения является направление получения и переработки вторичных полимеров с привлечением методов математического моделирования. Это позволит расширить сырьевую базу для производства изделий и повысить эффективность использования сырья на основе изучения свойств отходов различного происхождения, их состава, возможности организованного сбора и направленной модификации.

#### Литература

1. Осипова Т., Васильковский К. Пленки решили многие вопросы упаковки // Брутто. 2005. № 2. С. 11–14.
2. Штарке Л. Использование промышленных и бытовых отходов пластмасс. – Л.: Химия, 1987. – С.176.
3. Бухкало С.И. К вопросу энергосбережения процесса агломерирования полимерной упаковки // Інтегровані технології та енергозбереження. 2005. № 2. С. 29–33.

Bibliography (transliterated)

1. Osipova T., Vasil'kovskij K. Plenki reshili mnogie voprosy upakovki Brutto. 2005. # 2. p. 11–14.
2. Shtarke L. Ispol'zovanie promyshlennyh i bytovyh othodov plastmass. – L.: Himija, 1987. – p.176.
3. Buhkalo S.I. K voprosu jenergosberezhenija processa aglomerirovanija polimernoj upakovki Integrovani tehnologii ta energozberezhenija. 2005. # 2. p. 29–33.

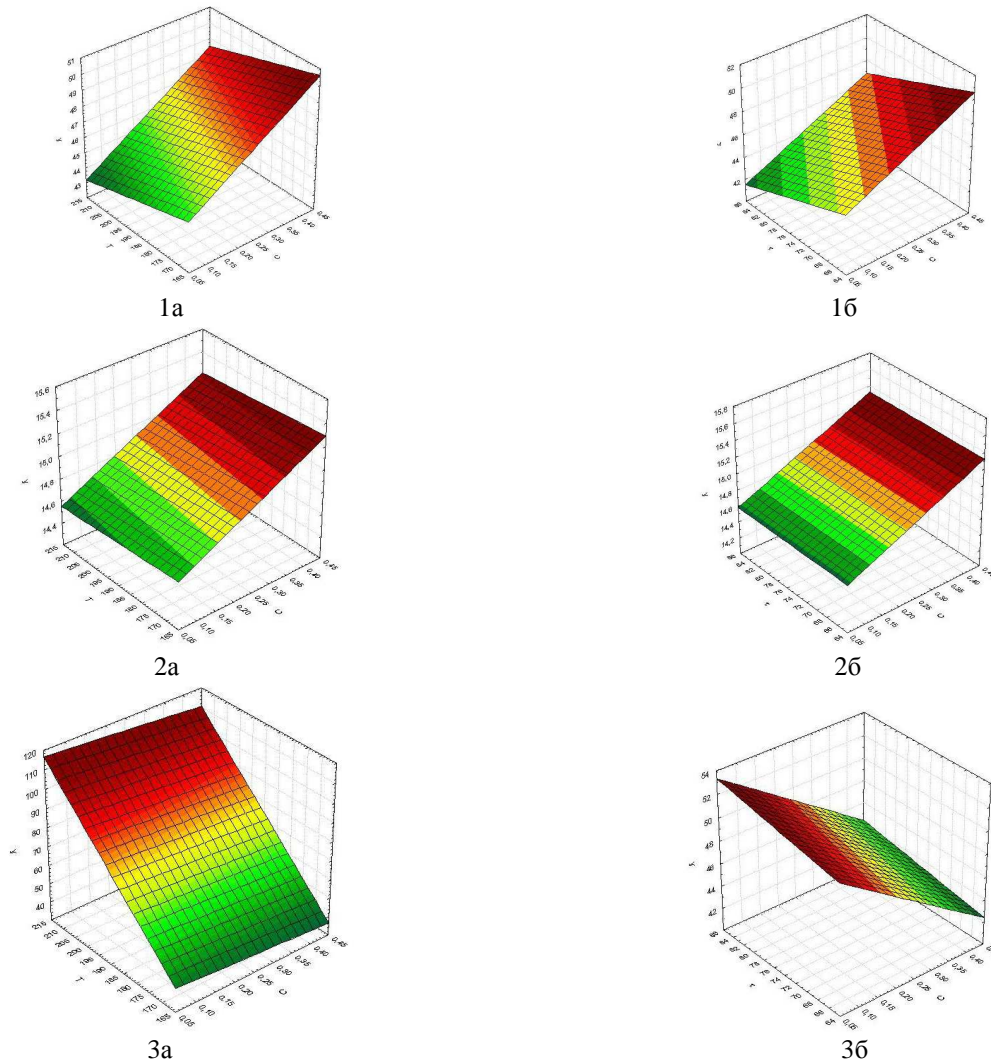


Рисунок 2 – Зависимость относительного удлинения ( $U_1$ , %), прочности при растяжении ( $U_2$ , МПа) и количества гель фракции ( $U_3$ , %) ВПЭ от: а) температуры литья ( $^{\circ}\text{C}$ ) и концентрации перекиси дикумила (%); б) времени литья изделия (с) и концентрации перекиси дикумила (%)

УДК 678.073.002

Бухкало С.І., Ольховська О.І, Борхович А.А., Лазарева Т.А.

### МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ДЛЯ ВИРІШЕННЯ ЗАДАЧ ОПТИМІЗАЦІЇ ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

При постановці проблеми вирішення задач енергозбереження враховані сучасні тенденції розвитку виробництва полімерних матеріалів, зокрема тари та упаковки. Показані зв'язки цієї розробки з актуальними питаннями охорони навколишнього середовища.

Bukhalo S.I., Olkhovska O.I., Borkhovych A.A., Lazareva T.A.

### THE SIMULATION PROCESS FOR SOLUTION OF ENERGY SAVING OPTIMIZATION PROBLEMS

The modern tendencies in development of polymers production were taking into account during energy saving problems formulation. The connection of the discussed problem with actual environmental problems was shown.

УДК 623.4.01

Анипко О.Б., Бусяк Ю.М.

**КОНЦЕПТУАЛЬНИЙ АНАЛІЗ ПРИ ФОРМУВАННІ ОСНОВНИХ  
ТАКТИКО-ТЕХНІЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК  
ПЕРСПЕКТИВНОЇ МАШИНИ ЛЕГКОЇ КАТЕГОРІЇ**

Современный этап развития бронетанковой техники (БТТ) характеризуется рядом особенностей, к которым следует отнести:

- изменение условий ведения боевых действий и связанного с этим расширения круга задач, решаемых бронетехникой;
- оснащение образцов БТТ комплектами оборудования типа BMC4ISR, объединяющие их в единую боевую систему;
- отсутствием сейчас и в обозримом будущем альтернативы танку и другой БТТ, как одних из основных вооружений сухопутных войск, и как следствие неснижающийся интерес к объектам БТТ на мировом рынке вооружений.
- разработку гаммы новых технологий в рамках комплексных программ: FCS (Future Combat Systems), США; FRES (Future Rapid Effects Systems), Великобритания; SEP (Splitterskyddad Enhet – s Plattform), Швеция; AHED (Advanced Hybrid Electric Drive), США и др.

Эти и другие факторы привели к тому, что на современном этапе объект БТТ – танк, БТР, БМП – уже не может создаваться без системного видения этого объекта как элемента некоторой надсистемы (гиперсистемы), что требует выполнения условий и требований интегрирования каждого такого элемента в систему как по горизонтали, так и с учетом иерархии (взаимоподчинения).

В то же время объект БТТ – как техническая система не может в равной степени удовлетворить требования по основным своим свойствам – подвижности, защищенности и огневой мощи. Поэтому любой образец представляет собой некоторое компромиссное решение с учетом выбранного (назначенного) приоритета.

В свою очередь определение приоритета составляет задачу концептуального анализа. Решение этой задачи предполагает следующее:

- сбор информации;
- обработку информации;
- анализ информации;
- прогнозирование показателей.

Наиболее важным этапом представляется первый, поскольку от полноты и достоверности исходной информации зависит конечный результат.

Эта информация должна собираться и накапливаться непрерывно, а источниками ее являются результаты:

- эвристических экспертиз;
- математического моделирования;
- экспериментов, в том числе боевого применения.

Информация собирается в соответствии с перечнем показателей объекта БТТ [1]. Однако, формат представления данных имеет произвольный вид. Если учесть, что такие банки данных создают разработчики и их субподрядчики, то очевидна необходимость унификации форматов представления данных. А с применением информационных технологий (CALS-технологий) она экономически целесообразна, особенно для сложной наукоемкой продукции.

Между тем, международные стандарты НАТО серии AQAP-2110 (Allied Quality Assurance Publications) предполагают создание упомянутого банка данных в формате PDM – системы, регламентированной стандартами ISO серии 10303. В этом формате сбору, обработке, ретроспективному, текущему и прогнозному анализу подвергаются показатели ТТХ, их фактические отклонения, фактические показатели надежности, ремонтпригодности, многие другие показатели на всех этапах жизненного цикла объекта от зарождения до утилизации. Эта информация используется для совершенства конструкции, технологии изготовления, снижения эксплуатационных расходов, т.е. всего того, что связано с постоянным улучшением потребительских (в нашем случае боеспособности и боеготовности) свойств образца. На этапе зарождения, разработки конструкторской, технологической, производственной и эксплуатационной документации применяются PDM-технологии, при производстве – ERP-технологии, при эксплуатации – ИЛП-технологии. Все эти технологии являются CALS-технологиями на соответствующих этапах жизненного цикла объекта.



Далее уместно подчеркнуть, что внедрению CALS-технологий в отечественное машиностроение вообще, а особенно в ОПК нет альтернативы. В тоже время не секрет, что уровень применения CALS-технологий в промышленности индустриально развитых стран выше, чем в Украине. Для постепенного внедрения CALS-технологий на предприятия ОПК и, прежде всего, для изделий, представляющих интерес на мировом рынке, целесообразна такая последовательность мероприятий:

1. Разработка новых и адаптация существующих стандартов Украины с CALS-технологиями, с параллельным обучением и переподготовкой кадров, в первую очередь проектировщиков и технологов;
2. Интеграция имеющихся программных разработок в единую информационную систему, проведение ее сертификации;

3. Создание нормативно-правовой базы применения CALS-технологий (равноправное применение электронных совместно с бумажной технической документацией);

4. Создание отечественных CALS-технологий;

5. Создание системы информационной безопасности в сфере CALS-технологий;

6. Создание условий, стимулирующих привлечение инвестиций на внедрение CALS-технологий, в том числе льгот и преференций по налогам, таможенным пошлинам (тарифам), льгот по кредитам и т.д.

Следует отметить, что на предприятиях ОПК Украины медленно, но постепенно осуществляются отдельные шаги по внедрению элементов ISO серии 9000. Поскольку, согласно “Концепции развития ВВ МВД Украины на период до 2015 года” предполагается обеспечение формирования современным вооружением и техникой, в том числе колесными бронированными машинами легкой категории, то представляется целесообразным уже на современном этапе для разработки ТТТ к такой технике разработать единый формат показателей, интегрируемый в PDM-систему для этой категории техники. Причем, по-видимому, он должен базироваться на существующем перечне показателей ТТХ легкобронированных машин [1], а также включать качественные показатели и вариативную часть – отражающую специфические требования, предъявляемые к технике, используемой для выполнения служебно-боевых задач ВВ МВД Украины.

На современном этапе наибольший интерес своим большим многообразием как вариантов и концептуальных проработок, а также осуществленных проектов представляют машины легкой категории. В тоже время основными свойствами, определяющими привлекательность машин этого класса, являются:

- широкий круг решаемых задач;
- существенно низкие, по сравнению с танками, капитальные и эксплуатационные затраты.

Все это в полной мере отражается и на соотношении танков и машин легкой категории в структуре БТТ различных стран мира (рис. 1).

Анализ доступных источников показывает, что основными современными тенденциями, определяющими облик перспективных машин легкой категории, являются:

### 1. Конструирование машины в целом

- модульный принцип построения;
- единый модуль, обеспечивающий подвижность;
- единая подвижная платформа (средство подвижности);
- ряд унифицированных сменных модулей вооружения;
- унификация ходовой части;
- способность интеграции в боевую систему, по крайней мере, тактического звена.

### 2. Вооружение

- дистанционное управление вооружением;
- способность вести борьбу с аналогичными машинами;
- ряд сменных модулей вооружения, устанавливаемых на единую платформу.

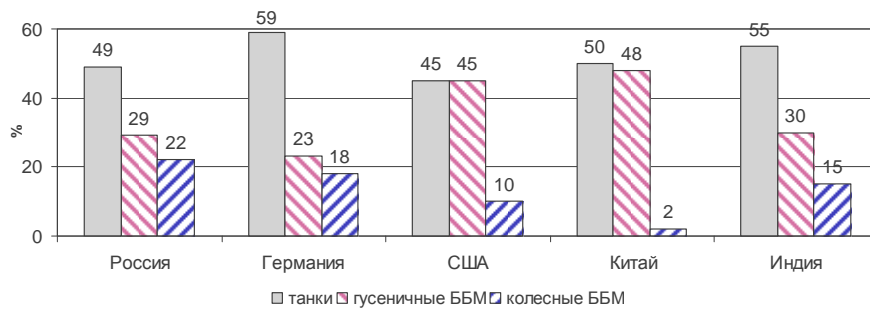
### 3. Защита

- пассивная защита на уровне 4 или 5 по STANAG 4569 с использованием съемных модулей;
- противоминная защита;
- снижение заметности, как на поле боя, так и в ИК и РЛ диапазонах.

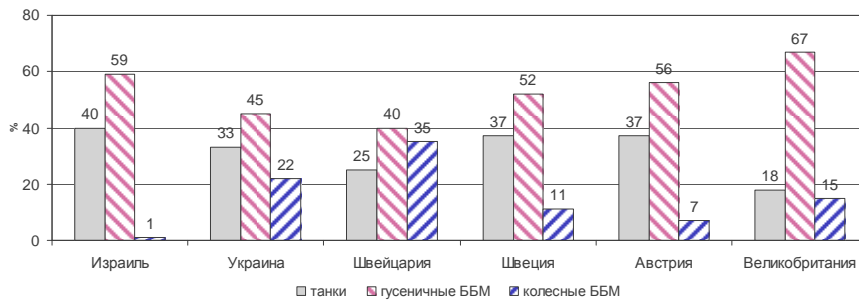
### 4. Подвижность

- приоритет оперативной подвижности за счет тактической (на поле боя);
- приоритет скорости даже в ущерб проходимости (по шоссе 60–75 км/час в ротной колонне);
- снижение расхода топлива на 30–40 %;
- обеспечение авиатранспортабельности по массе и габаритам.

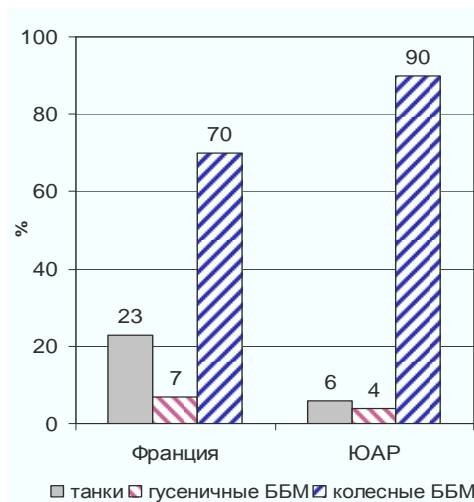
Все это в совокупности с требованиями, связанными с решением конкретных задач, как например полицейские и миротворческие операции, определяет облик машины в целом.



а) 1-я группа стран



б) 2-я группа стран



в) 3-я группа стран;

Рисунок 1 – Процентный состав парка БТТ разных стран

Причем в соответствии с функциональным назначением номенклатурный ряд легких машин представляется состоящим из следующих машин:

- БТР;
- БМП;
- машина огневой поддержки;
- машина ПВО;
- машина управления;
- транспортная машина;
- ряд инженерных машин;
- машина разведки.

Кроме этого, учитывая тот факт, что оснащение вооружением и техникой других силовых структур осуществляется МО на основе разработанных образцов для ВС путем их модификации и адаптации с

учетом специфики решаемых задач, номенклатурный ряд для ВВ МВД Украины может быть дополнен следующими опциями:

- оборудование разграждения (бульдозер);
- навигационное информационное оснащение;
- оснащение специальными средствами (средства несмертельного действия).

Кроме этого по назначению могут быть выделены:

- машина для перевозки осужденных;
- патрульная машина;
- машина со спецсредствами по поддержанию общественного порядка;
- машина для транспортировки особо важных грузов;
- машина управления.

Ко всем этим машинам относятся и общие требования, такие как:

- диапазон рабочих температур (–30 ... +55)<sup>0</sup>С;
- назначенный срок эксплуатации не менее 30 лет;
- автономность в районе выполнения задач по функциональному назначению не менее 1 суток;
- требования эргономичности размещения операторов;
- способность передвижения без сопровождения транспортом ГАИ.

В заключении следует отметить, что подобная задача не нова, и в 60-е годы она успешно была решена ОГК-Т ХТЗ им. С.Орджоникидзе, когда на базе единой платформы МТЛБ был создан большой номенклатурный ряд (более 80 опций) машин различного назначения [5]. Эта машина до настоящего времени эксплуатируется в составе вооруженных сил и народном хозяйстве многих стран. Производство данной машины продолжается в Болгарии, Польше, а в Российской Федерации проводится глубокая модернизация этих машин.

### Литература

1. Анипко О.Б. Концептуальное проектирование объектов бронетанковой техники / Анипко О.Б., Борисюк М.Д., Бусяк Ю.М. – Х.: НТУ “ХПИ”, 2008. – 196 с.
2. Оружие и технологии России. Энциклопедия XXI век: т.VII: Бронетанковое вооружение и техника / ред. Иванов С. – М.: 2003. – 784 с.
3. Army Guide Monthly. [www.army-guide.com](http://www.army-guide.com).
4. Jane's defense weedy. [www.jdw.com](http://www.jdw.com).
5. Бабакин А. Многоцелевой легкий бронированный тягач МТЛБ. Модернизация военной техники. [Электронный ресурс].

### Bibliography (transliterated)

1. Anipko O.B. Konceptual'noe proektirovanie ob"ektov bronetankovoj tehniky / Anipko O.B., Borisjuk M.D., Busjak Ju.M. – H.: NTU “HPI”, 2008. – 196 p.
2. Oruzhie i tehnologii Rossii. Jenciklopedija XXI vek: t.VII: Bronetankovoe vooruzhenie i tehnika / red. Ivanov S. – M.: 2003. – 784 p.
3. Army Guide Monthly. [www.army-guide.com](http://www.army-guide.com).
4. Jane's defense weedy. [www.jdw.com](http://www.jdw.com).
5. Babakin A. Mnogocелеvoj legkij bronirovannyj t'jagach MTLB. Modernizacija voennoj tehni-ki. [Elektronnyj resurs].

УДК 623.4.01

Аніпко О.Б., Бусяк Ю.М.

### КОНЦЕПТУАЛЬНИЙ АНАЛІЗ ПРИ ФОРМУВАННІ ОСНОВНИХ ТАКТИКО-ТЕХНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЕРСПЕКТИВНОЇ МАШИНИ ЛЕГКОЇ КАТЕГОРІЇ

Проведено аналіз основних ТТХ перспективної машини легкої категорії.

Anipko O.B., Busiak Yu.M.

**THE CONCEPTUAL ANALYSIS OF BASIC FIELD TECHNICAL CHARACTERISTICS  
FORMATION FOR PERSPECTIVE LIGHT VEHICLE**

The analysis of basic field technical characteristics of perspective light-category vehicle was carried out.

УДК 661.842+668.8

Товажнянский Л.Л., Капустенко П.А., Бухкало С.И., Перевертайленко А.Ю., Арсеньева О.П.

### АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ КОМПЛЕКСНОЙ ПЕРЕРАБОТКИ ФОСФОРСОДЕРЖАЩЕГО СЫРЬЯ

**Постановка и актуальность проблемы.** Постановка проблемы заключается в оценке возможностей эффективной переработки фосфорсодержащего сырья и отходов этого производства. Прежде всего, необходимо отметить, что в Украине имеется ряд месторождений фосфатного сырья, однако, для них характерно невысокое содержание  $P_2O_5$ . Ввиду повышения цен на концентраты хибинских апатитов, запасы, которых в значительной степени исчерпаны, в качестве альтернативного сырья в настоящее время Украина использует, в основном, импортируемые фосфаты стран Ближнего Востока. По сравнению с хибинскими апатитами, для импортируемых фосфоритов характерно более высокое содержание природных радионуклидов и неорганических соединений, таких элементов, как кадмий, свинец, мышьяк, которые представлены, в основном, в виде нерастворимых соединений.

Отрасль производства фосфорсодержащих удобрений – основного потребителя фосфорсодержащего сырья (ФСС), за последние годы значительно снизила объемы производства. Украина оказалась перед угрозой полного исчезновения в грунтах доступных форм фосфатов, которые были накоплены за годы интенсивной химизации. Так, уменьшение доз внесения фосфорных удобрений на 80 % сравнительно с 1990 г. привело к снижению средневзвешенного подвижного фосфора в грунтах за последние 10 лет на 1,1–1,4 мг. Эффективность сельскохозяйственного производства зависит от своевременного внесения необходимого количества минеральных удобрений для компенсации потери с урожаем действующего вещества. В Украине площадь пашни с низким и средним содержанием подвижного фосфора составляет почти 57 % общей площади [1]. Именно за счет низкой обеспеченности грунтов в настоящее время доступным для растений фосфором, окупаемость фосфорных удобрений может быть довольно высокой, т.к. в среднем 1 кг  $P_2O_5$  обеспечивает прирост 4–5 кг зерна или 30–40 кг корней сахарной свеклы.

Технологические схемы, используемые для получения удобрений из фосфатного сырья, базируются, главным образом, на разложении обогащенного фосфорсодержащего материала кислотой или смесью кислот. При применении наиболее широко распространенного сернокислотного метода вскрытия апатита (рис. 1) из сырья извлекается около 94 % фосфора, 10–20 % фтора и часть образующегося фосфогипса.

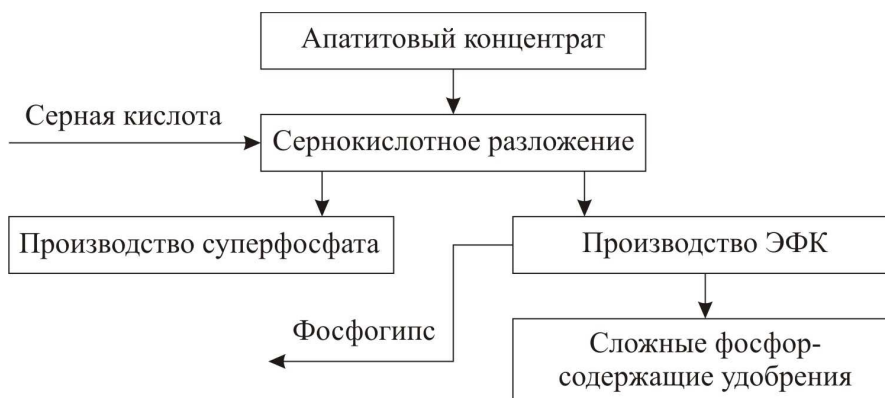


Рисунок 1 – Упрощенная функциональная схема сернокислотного разложения ФСС

Основную проблему при таком методе переработки апатитов и фосфоритов на минеральные удобрения с точки зрения экологической безопасности представляет утилизация фосфогипса, стронция и др.

Проблема использования фосфогипса (ФФГ), теоретические и практические вопросы утилизации его как отходов производства нарастают от года к году – концентрированные и сложные удобрения, содержащие  $P_2O_5$  в водорастворимой форме, производятся на основе экстракционной фосфорной кислоты (ЭФК), а при производстве 1 т ЭФК, получаемой сернокислотным разложением фосфатного сырья получается 4,3–5,8 т ФФГ.

Основной способ использования образовавшегося ФФГ как на постсоветском пространстве, так и за рубежом – удаление его с места производства различными методами и складирование в отвалах с целью дальнейшего использования. Капитальные и эксплуатационные затраты на содержание отвалов ФФГ составляют соответственно 30 и 10 % стоимости производства ЭФК. Следует также отметить, что в Украине введена 4-х уровневая классификация опасности отходов и фосфогипс отнесён к 4-му классу опасности. Норматив платы за размещение отходов 4-го класса опасности установлен на уровне 0,3 гривны за 1 тонну отхода [2].

**Цель исследования.** Цель статьи – выбор способов конверсии ФФГ, для вновь сооружаемых предприятий и реконструкции существующих, которые учитывают не только конкретные условия региона, возможности промышленной площадки и технологические особенности переработки сырья, но и возможность создания безотходных энерго- и экономически эффективных комплексов по переработке фосфатного сырья, и ФФГ в частности, в целевые продукты (рис. 2).

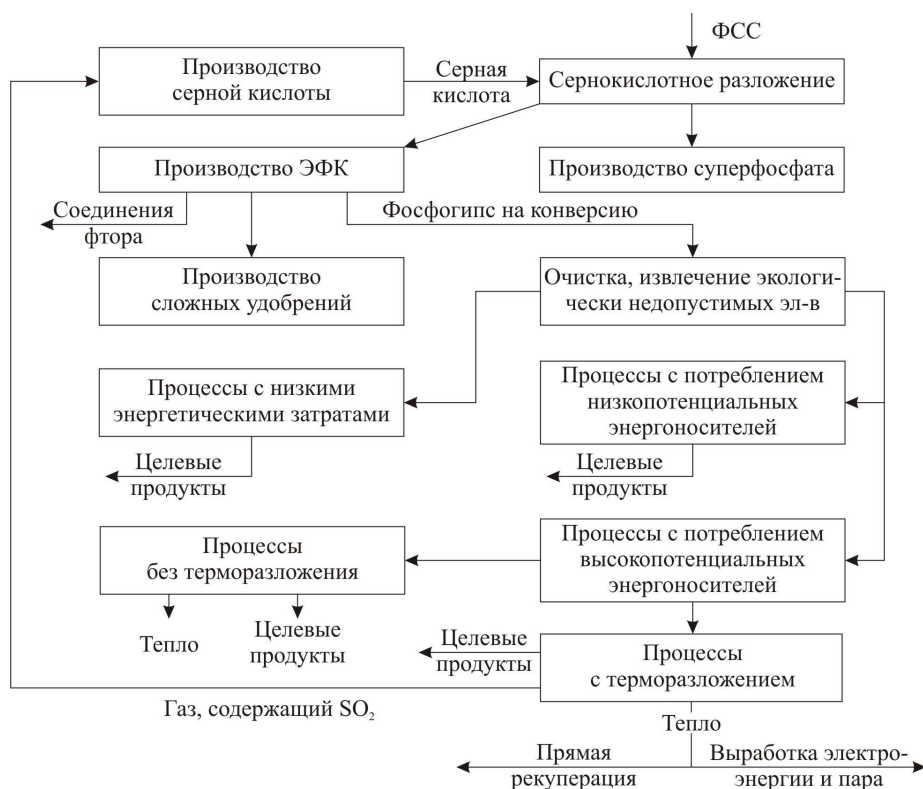


Рисунок 2 – Функциональная схема комплексной переработки ФСС

Наибольший эффект по повышению энергоэффективности технологических систем процессов конверсии фосфогипса может быть достигнут при оптимальной тепловой интеграции таких технологических систем в производственный комплекс фосфоросодержащих удобрений. Такая интеграция предполагает использование широкого спектра теплоэнергетического оборудования: котлов-утилизаторов, турбин, теплообменников «высокотемпературные газы/воздух», теплообменников для нагрева твердых частиц в псевдооживленном слое, теплообменников «пар/вода» и т.д. Большое значение для успешной реализации подобной интеграции имеет правильный выбор эффективного и надёжного теплоэнергетического оборудования. Таким образом, совершенствование процессов производства экстракционной кислоты в сочетании с тепловой интеграцией технологических систем конверсии фосфогипса в производственные комплексы фосфоросодержащих удобрений позволяют превратить фосфогипс из обременительного отхода производства в продукцию или, по крайней мере, сырьё для производства продукции. Стратегия выбора технологии конверсии фосфогипса должна основываться на требованиях рынка.

К процессам с низкими энергетическими затратами относится применение фосфогипса в сельском хозяйстве, где энергозатраты могут иметь место, в основном, при транспортировке. Ко второй группе относятся процессы с использованием низкопотенциальных энергоносителей (100–300 °С), например, процессы производства гипсовых вяжущих в виде α-полугидрата, в качестве низкопотенциального энергоносителя используется водяной пар с температурой 120–160 °С для процесса дегидратации

фосфогипса. К третьей группе относятся процессы с использованием высокопотенциальных энергоносителей (более 300 °С), в частности, производства вяжущих в виде β-полугидрата (обжиговых вяжущих) и некоторые комплексные технологии переработки фосфогипса: получение цементного клинкера и серной кислоты, получение сульфата аммония, мела и концентрата редкоземельных элементов, серной кислоты и агломерата для дорожного строительства, то есть процессы с потреблением высокопотенциальных энергоносителей [3, 4].

Проведенный анализ процессов производства вяжущих в виде β-полугидрата (Knauf, Rhone-Poulenc, Nissan, CERPHOS и др.) позволяет составить обобщенную функциональную схему (рис. 3).

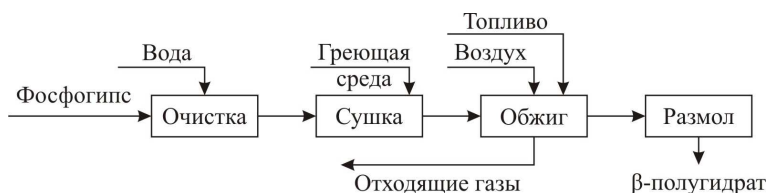


Рисунок 3 – Обобщенная функциональная схема производства вяжущих в виде β-полугидрата

Повышение энергоэффективности технологий конверсии фосфогипса может быть также связано с рекуперацией тепла отходящих горячих газов в самих процессах (рис. 4). Тепло отходящих горячих газов может быть использовано для получения пара и электроэнергии, как это предложено в технологии производства из фосфогипса серной кислоты, и агломерата для дорожного строительства, разработанной Флоридским институтом исследования фосфатов и компанией (США).

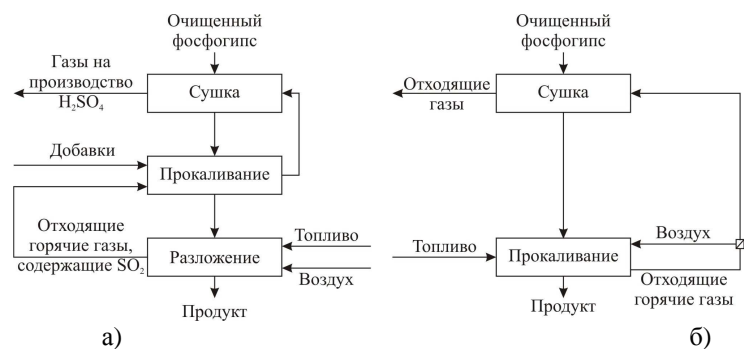


Рисунок 4 – Рекуперация тепла горячих газов:

а) в производстве цементного клинкера и серной кислоты, процесс Lurgi G.m.b.H – Babcock–BSH;

б) в производстве вяжущих в виде β-полугидрата,

▣ – теплообменник для подогрева воздуха теплом отходящих газов

Возможность повышения энергоэффективности отдельных производств комплекса можно изучить на примере стандартной схемы получения ЭФК. Главный путь совершенствования и интенсификации процесса на этой стадии – оптимизация условий разложения фосфатов и кристаллизации сульфата кальция в реакционном объеме. Это требует совершенствования технологического процесса и улучшения аппаратного оформления основного оборудования. Однако, рост цен на энергоносители и усиление экологических требований к производству, заставляют обратить внимание и на вспомогательное оборудование, такое как теплообменные аппараты, использующиеся в технологической цепочке в качестве подогревателей и охладителей продуктовых и вспомогательных потоков. Существующая в настоящее время тенденция замены кожухотрубчатых теплообменных аппаратов на более эффективные компактные (пластинчатые и спиральные) показала, что такая замена приводит к существенной экономии средств в процессе эксплуатации, а также обладает преимуществами в обслуживании [5]. Кроме того, компактность пластинчатых теплообменников позволяет при их установке существенно экономить производственные площади и облегчить доступ к основному оборудованию.

Известные решения по использованию фосфогипса, как сырья химической промышленности, предлагают получать из него один, реже два продукта. Вторичные отходы, образующиеся при этом, имеют ограниченный спрос и практически не находят применения. Это имеет место, например, в предложениях по получению из него сульфата аммония или серной кислоты, выщелачиванию кислотами с дальнейшим получением соединений редкоземельных элементов.

Технологія комплексної переробки фосфогіпса, пропонувана нами (рис. 2) включає в себе попередню очищення фосфогіпса та вилучення з нього екологічно неприпустимих елементів по процесам з різними енергетичними витратами перед отриманням з нього цільових продуктів:

- гіпс для хімічної меліорації ґрунту;
- гіпсові зв'язувачі в формі  $\alpha$ -полугідрату;
- гіпсові зв'язувачі в формі  $\beta$ -полугідрату;
- сірчана кислота;
- цемент або інший матеріал (агломерат для фундаментів, основань доріг тощо);
- сульфат натрію;
- сульфат амонію;
- карбонат кальцію;
- окисли або солі рідкоземельних елементів (РЗЕ);
- углекислий стронцій та ін.

В суммі рідкоземельних елементів, виділених з фосфогіпса, містяться цінні рідкоземельні елементи: тербій, іттербій, ербій, диспрозій. Традиційні області використання нез'єднаних сумішей рідкоземельних елементів металургія, нафтехімія, виробництво спеціального скла та кераміки, машинобудування та інші галузі.

Основною задачею створення комплексів по переробці різних видів фосфорсодержачого сировини є розробка асортименту вироблюваної конкурентоспроможної продукції. Слід мати на увазі, що основним крупнотоннажним традиційним споживачем фосфорсодержачих продуктів може бути не тільки сільське господарство. Основними можливостями зниження собівартості продукції можна назвати наступні інноваційні фактори:

- впровадження енергозберігаючих науково обґрунтованих технологій;
- впровадження сучасного теплоенергетичного обладнання та автоматизація технологічних процесів;
- використання відходів як сировини.

Таким чином, враховуючи вищеописане можна зробити висновок про те, що найбільш правильним підходом до визначення ефективності та рентабельності виробництва – це комплексний підхід. При цьому капітальні витрати та експлуатаційні витрати, зокрема, при сірчаній переробці фосфатної сировини слід розраховувати для єдиного промислового комплексу виробництва фосфорної кислоти та добрив на її основі, кремнефтористоводородної кислоти та фтористих солей на її основі, фосфогіпса та продуктів його переробки, а також інших необхідних продуктів для різних галузей промисловості. Слід зауважити, що асортимент випущеної продукції виробничими комплексами може бути значно розширено з урахуванням сучасних потреб багатьох галузей промисловості.

При цьому для визначення рентабельності виробництва фосфорсодержачих добрив з загальних експлуатаційних витрат слід списувати (за діючими оптовими цінами) вартість продуктів, отриманих з відходів цього виробництва, а для визначення ефективності – з загальних приведених витрат – приведені витрати на виробництво аналогічних продуктів з традиційних видів сировини.

Концепції підвищення енергоефективності вищеописаних технологій можуть бути пов'язані з наступними основними особливостями проведення конверсії.

1. Підвищення ефективності процесів самої технології.
2. Інтеграція окремих технологічних процесів в виробничий комплекс, бажано, малоотходний.
3. Організація правильного вибору ефективного та надійного теплоенергетичного та, зокрема, теплообмінного обладнання.

Прикладом реалізації першої концепції може служити процес отримання сірчаної кислоти та цементного клинкера, подібна схема рекуперації тепла може бути застосована та в виробництві обжигових зв'язувачів, де тепло відходящих газів може бути використано для підігріву повітря, поступаючого на стадію обжигу (рис. 2).

Інтеграція технологічної системи конверсії фосфогіпса в склад виробничого комплексу фосфорсодержачих добрив передбачає функціонування цієї системи разом з іншими хіміко-технологічними системами виробничого комплексу. Ефективно використовувати енергетичні ресурси в таких комплексах дозволяють спеціальні методи інтеграції теплових процесів. Якщо кількість енергії, виробленої технологічною системою перевищує потреби самої системи, то енергія може бути експортована в іншу систему і, навпаки, якщо є потреба,



она может быть импортирована из другой системы комплекса. Примером реализации подобной концепции может служить технология производства из фосфогипса серной кислоты и агломерата.

Последовательности чередующихся нагревов и охлаждений на всех этапах производства, от первичной переработки сырья до получения конечного продукта, требует широкого использования теплообменников и интеграции потоков. В этой связи выбор эффективного теплообменного оборудования для нагрева, охлаждения и рекуперации имеет первостепенное значение для экономичной работы всего производства в целом.

**Выводы.** Таким образом, в результате проведенной работы можно сделать выводы, что реализация энергосберегающих мероприятий конверсии фосфогипса в сочетании с тепловой интеграцией технологических систем производственных комплексов фосфорсодержащих удобрений дают возможность превратить фосфогипс из обременительного отхода производства в продукцию или, по крайней мере, сырьё для производства продукции. Стратегия выбора технологии конверсии фосфогипса должна основываться на требованиях рынка.

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

#### Литература

1. Виробництво фосфоровмісних мінеральних добрив підприємствами України та їх використання у сільському господарстві. За ред. Зареченого В.Г. Суми, «Університетська книга», 2004, 189 с.
2. Постановления Кабинета Министров Украины № 303 от 1 марта 1999г. и № 626 от 21 июля 2005 г .
3. Исследование процесса конверсии фосфогипса в сульфат аммония /В.Н. Ламп, Т.Ф. Абашкина, Н.М. Бризицкая и др. // Реф. информация НИУИФа "Промышленность минеральных удобрений и серной кислоты". Вып. 247. – М.: НИИТЭХИМ, 1983. – С. 8–11.
4. Kuberska J. Rozklad fosfogipsu weglanem sodowym // Chemia stosowana.– 1986.– 30.– № 1.– S. 113–116.
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. Virobnictvo fosforovmisnih mineral'nih dobriv pidpriyemstvami Ukrayini ta yih vikoristan-nja u sil'skomu gospodarstvi. Za red. Zarechenogo V.G. Sumi, «Universitets'ka kniga», 2004, 189 p.
2. Postanovlenija Kabineta Ministrov Ukrainy # 303 ot 1 marta 1999g. i # 626 ot 21 ijulja 2005 g .
3. Issledovanie processa konversii fosfogipsa v sul'fat ammonija V.N. Lamp, T.F. Abashkina, N.M. Bri-zickaja i dr. Ref. informacija NIUIFa "Promyshlennost' minepal'nyh udobpenij i sepoj kisloty". Vyp. 247. – M.: NIITJeHIM, 1983. – p. 8–11.
4. Kuberska J. Rozklad fosfogipsu weglanem sodowym Chemia stosowana.– 1986.– 30.– # 1.– p. 113–116.
5. Plastinchatye teploobmenniki v promyshlennosti /L.L. Tovazhnjanskij, P.A. Kapustenko, G.L. Havin, O.P. Arsen'eva. – Har'kov: NTU «HPI», 2004.– 232 p.

УДК 661.842+668.8

ТОВАЖНЯНСЬКИЙ Л.Л., КАПУСТЕНКО П.О., БУХКАЛО С.І., ПЕРЕВЕРТАЙЛЕНКО О.Ю., АРСЕНЬЄВА О.П.

#### АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ КОМПЛЕКСНОЇ ПЕРЕРОБКИ ФОСФОРОВМІСНОЇ СИРОВИНИ

Розглянуто можливість ефективної комплексної переробки фосфоровмісної сировини. Реалізація енергозберігаючих заходів конверсії фосфогіпсу у сукупності з тепловою інтеграцією технологічних систем виробничих комплексів фосфоровмісних добрив дозволяє перетворити фосфогіпс із обтяжливого відходу виробництва в продукцію або, у крайньому випадку, у сировину для виробництва продукції. Відзначено, що здобуття концентратів рідкісноземельних елементів може бути привабливим з економічної точки зору.

Tovazhnyansky L.L., Kapustenko P.A., Bukhhalo S.I., Perevertaylenko A.Yu., Arsenyeva O.P.

**ANALYSIS OF PHOSPHOROUS CONTAINING RAW COPLEX TREATMENT EFFECTIVENESS**

The possibility of effective complex treatment of phosphorous containing raw is discussed. The realization of energy saving approaches in phosphogypsum conversion together with heat process integration for fertilizer producing sites lets to converse phosphogypsum from waste to saleable products or at least to raw materials for their production. It is mentioned that extraction of rare-earth elements from phosphogypsum may be profitable.

### ФУРАНО-ЭПОКСИДНЫЕ ПОКРЫТИЯ ДЛЯ СТРОИТЕЛЬНОЙ ИНДУСТРИИ

**Актуальность проблемы.** Фурано-эпоксидные полимеры нашли применение в качестве связующих для композиционных материалов, предназначенных для защитных антикоррозионных покрытий на поверхности бетонных и стальных изделий и конструкций в строительной индустрии [1,2].

**Цель исследования.** Представляло интерес исследовать влияние структуры, параметров поверхностных свойств, гранулометрического состава дисперсных наполнителей на деформационно-прочностные и эксплуатационные свойства (на примере внутренних напряжений) фурано-эпоксидных защитных покрытий элементов строительных конструкций.

В качестве полимерного связующего выбраны фурано-эпоксидный реакционноспособный олигомер ФАЭД, представляющий собой продукт термомеханического совмещения фурфуролацетонового мономера ФАМ и эпоксидиановых олигомеров ЭО (марок ЭД-16, ЭД-20, ЭД-22) в массовом соотношении 1 : 1, а также смесь олигомеризованного ФАМ и ЭО (ФЭО).

Наполнителями служили минеральные (кварцевый песок – КП, каолин – КН, периклаз – ПК, карбонат кальция – КК) дисперсные наполнители и графит – ГР. Структурирующий агент – полиэтиленполиамин – ПЭПА. Модификатором полимерной матрицы для некоторых композиционных систем выбрана каменноугольная смола – КУС. Модификаторы поверхности дисперсного наполнителя – кислоты Льюиса (хлорид алюминия, железа, кобальта и др.) и полимеры из ряда полиацеталей (поливинилбутираль, поливинилбутиральфурфураль и др.). Отверждение фурано-эпоксидного реакционноспособного олигомера осуществляли по режиму: 20 °С – 24 ч., 60 °С – 2 ч, 80 °С – 6 ч.

Химическую природу поверхности наполнителей оценивали с помощью интегрального показателя «*pH* поверхности», определяемого по стандартной методике [3]. Кислотостойкость наполнителей определяли по ГОСТ 473.1-78 кипячением в 20 % серной кислоте. Гранулометрический состав и средней диаметр эквивалентной сферы  $d_{эс}$  частиц наполнителей определяли методами седиментации, ситового анализа [3] и оптической микроскопии [4]. Модуль упругости Юнга  $E$  и коэффициент Пуассона  $\mu$  полимерных композитов определяли по стандартной лабораторной методике [3]. Модули сдвига  $G$  оценивали по известным соотношениям [5].

Оценка максимального размера частиц  $R_{\max}$  (мкм), соответствующего связным дисперсным системам, для группы исследованных наполнителей проводилась по известной методике в рамках модели Ребиндера–Щукина–Марголяна с учетом истинной плотности  $\rho$  (кг/м<sup>3</sup>), дальности действия молекулярных сил  $h_c$  (примерно 0,3 нм), константы Гаммакера  $A$  (для частиц с гладкой поверхностью  $A = 10^{-20}$  Дж) [6]:

$$R_{\max} = \sqrt{\frac{A}{12 \cdot \rho \cdot g \cdot h_c^2}}.$$

Значение  $R_{\max}$  для исследованных дисперсных наполнителей находится в пределах 450–540 мкм, т.е. анализируемые системы относятся к группе высокодисперсных связных порошков, обладающих способностью к агрегируемости [7].

Сила молекулярного притяжения между частицами наполнителя  $F_c$  (Н) в первом приближении определяется степенью дисперсности  $F_c = A \cdot R / (12 \cdot h_c^2)$  и для интервала диаметров частиц 0,1–500 мкм находится в пределах:  $(0,463 \cdot 10^{-9} - 2,314 \cdot 10^{-6})$  Н.

Прочность дисперсной системы  $\sigma_o$ , связанная с силами притяжения частиц друг к другу, –  $\sigma_o \approx F_c / R^2$  [6] – (аутогезией, отождествляемой с прочностью порошка при растяжении, т.е. прочностью на разрыв) для исследованных материалов варьируется в диапазоне 185,5–0,037 кПа.

Величина  $\sigma_n$ , характеризующая нормальное напряжение, при отсутствии дополнительной нагрузки –  $\sigma_n \approx \rho \cdot g \cdot R$  [6] – определяется только весом исследованных наполнителей, и находится в пределах: 0,001325–6,625 Па.

В соответствии с критерием связности дисперсных систем [6], видно, что  $\sigma_o \gg \sigma_n$ , т.е. в анализируемых дисперсных материалах преобладает сцепление частиц за счет поверхностных сил.

Несмотря на достаточную приближенность и простоту интегральным показателем активности (реакционной способности) сложного химического состава поверхности дисперсных наполнителей служит его  $pH$  (табл. 1), влияющая на смачиваемость, состав межфазного слоя, характер направленности и кинетику реакций структурирования ФАЭД и ФЭО и в конечном итоге на комплекс свойств фурано-эпоксидных композитов. Знание этого параметра позволяет оценить количество кислотных ( $C_n$ ) и основных ( $C_{он}$ ) центров (реакционных центров Бренстеда) на поверхности исследованных наполнителей (табл. 1).

Таблица 1 – Некоторые свойства поверхности исследованных наполнителей

Наименование показателя	КП	КПМ <sub>к</sub>	КПМ <sub>а</sub>	КН	ПК	КК	ГР
$pH$ поверхности наполнителя	7,8	6,7	7,4	4,5	7,6	9,5	7,5
$pOH$ поверхности наполнителя	6,2	7,3	6,6	9,5	6,4	4,5	6,5
$C_n 10^9$ , моль/г	1,6	19,9	4,0	3162	2,5	0,032	3,2
$C_{он} 10^8$ , моль/г	6,3	0,5	2,5	0,003	4,0	316,2	3,2
Кислотостойкость, %	97	96	96	95	92	-	98

Примечание: КПМ<sub>к</sub>, КПМ<sub>а</sub> – КП, модифицированный кислотами Льюиса и полиацеталами соответственно.

Как видно из табл. 1, на поверхности дисперсных наполнителей имеется значительное количество кислотных и основных центров Бренстедовского типа, зависящих от типа системы и определяющих физико-химическое состояние поверхности и ее активность по отношению к ФАЭД и ФЭО. В основном приведенные данные совпадают с экспериментальными результатами по определению содержания центров адсорбции (РЦА) на поверхности минеральных наполнителей спектрофотометрическим методом [8].

Все исследованные наполнители (кроме КК) обладают достаточно высоким уровнем кислотостойкости (табл. 1)

Для исходного КП  $pH$  поверхности составляет 7,8 что позволяет говорить о высокой полярности силанольных групп  $SiOH$ , содержащих полимолекулярный слой воды на поверхности наполнителя.

Модификация КП кислотами Льюиса (хлоридами алюминия, железа, кобальта и др.) приводит, по-видимому, к тому, что на поверхности возрастает возможность образования кислотных центров Льюиса и формируются координационно-ненасыщенные катионы металлов (особенно при повышенных температурах), способные акцептировать электронную пару.

Учитывая тот факт, что  $pH$  фурфуролацетоновых мономеров ФА и ФАМ (основных ингредиентов ФАЭД и ФЭО) имеют соответственно значение 4,2 и 4,65, а  $pOH$  9,8 и 9,35 (т.е. концентрация в кислотных  $C_n$  и основных  $C_{он}$  центров в мономере ФА составляет  $6,309 \cdot 10^{-5}$  моль/л и  $1,585 \cdot 10^{-10}$  моль/л, а в мономере ФАМ  $2,239 \cdot 10^{-5}$  моль/л и  $4,457 \cdot 10^{-10}$  моль/л соответственно) то в рамках электростатического взаимодействия следовало бы ожидать формирования более прочного межфазного слоя в композитах с наполнителями, обладающими основными свойствами (например, КК), менее прочного межфазного слоя у композитов с кислотными дисперсными системами (например, КН). Однако экспериментальные исследования не выявляют четкой корреляции в этом вопросе.

Из группы исследованных наполнителей только КК и КН, являясь малорастворимыми продуктами, в воде (например, при длительной эксплуатации в водных средах) способны диссоциировать на ионы и переходить в раствор: КК является солью, а КН в составе содержит гидратированный оксид алюминия  $Al(OH)_3$ . В результате анализа параметров растворимости ПР [9–11] данных веществ – для  $CaCO_3$  ПР составляет  $4,8 \cdot 10^{-9}$ , а для  $Al(OH)_3$  –  $5,11 \cdot 10^{-33}$ -, очевидно, что с поверхности КК (учитывая в первом приближении, что активности ионов равны их концентрациям) в раствор переходит ионов  $[Ca^{2+}] = [CO_3^{2-}] = 6,93 \cdot 10^{-6}$  моль/л, а  $Al(OH)_3$  ввиду ничтожности ПР практически не диссоциирует на ионы.

Как видно из табл. 2, гранулометрический состав исследованных наполнителей (фракция менее 125 мкм) примерно одинаков, имеет бимодальный характер (кроме КК): для исходного и модифицированного КП, а также ПК первый пик находится в интервале 5–10 мкм; для КК – 10–20 мкм; для КН – 20–30 мкм; второй пик для дисперсных систем находится в диапазоне 50–125 мкм. Обработка КП в процессе совместного помола с кислотами Льюиса и полиацеталами несколько смещают распределение частиц по размерам в область более низких значений, не изменяя характер кривой распределения.

В связи с тем, что строительные изделия и конструкции с защитными фурано-эпоксидными покрытиями в процессе изготовления и эксплуатации испытывают как краткосрочные, так и долговременные нагрузки (напряжения), то возникает необходимость проанализировать различные варианты возникновения напряжений в полимерном покрытии.

Таблица 2 – Гранулометрический состав систем (фракция менее 125 мкм)

Размер частиц, мкм	КП	КПМ <sub>к</sub>	КПМ <sub>а</sub>	КН	КК	ПК
– менее 1,5	1,9	2,6	2,8	13,7	0	0,5
– 1,5–3,0	1,7	2,2	2,4	8,7	0	1,2
– 3–5	3,0	4,1	3,8	0	7	3,1
– 5–10	20,7	25,8	23,7	7,4	18	15,8
– 10–20	10,7	12,5	11,7	15,9	28	8,5
– 20–30	13,0	10,5	11,2	19,7	21	10,3
– 30–50	16,6	13,7	15,2	0	12	25,6
– 50–125	32,4	28,6	29,2	34,5	14	35,0

Примечание: КПМ<sub>к</sub>, КПМ<sub>а</sub> – кварцевый песок модифицированный кислотами Льюиса и полиацеталами («сухая» технология) соответственно.

В качестве примера для анализа выбраны следующие фурано-эпоксидные (наполненные и ненаполненные) композиционные материалы: 1 – ФАЭД-50(20) + ПЭПА; 2 – ФАЭД-50(20) + ПЭПА + КП; 3 – ФАЭД-50(20) + КУС + ПЭПА; 4 – ФАЭД-50(20) + КУС + ПЭПА + КП. Основой (субстратом) могут быть как бетонные, так и металлические основания. В данном варианте анализа в качестве основы выбраны – металлические (стальные) изделия и конструкции.

В случае возникновения напряжений в полимерном покрытии, которые проявляются вследствие нагружения основы (субстрата), в плоскости адгезионного контакта на границе раздела «покрытие–основа» возникают касательные напряжения, приводящие к адгезионному разрушению фурано-эпоксидного покрытия. Максимальные касательные напряжения  $\tau_{\max}$  на границе раздела фаз (рис. 1) можно оценить по соотношению [12,13]:

$$\tau_{\max} = p \frac{L}{E_o \cdot k} thkl,$$

где коэффициенты  $L$  и  $k$  являются функциями, зависящими от модуля упругости покрытия  $E_n$ .

$$L = 2 \frac{\frac{G_o \cdot G_n}{H \cdot h}}{\frac{G_o}{H} + \frac{G_n}{h}}; k^2 = L \left( \frac{1}{E_o \cdot H} + \frac{1}{E_n \cdot h} \right),$$

где  $E_o$ ,  $E_n$  – модули упругости стальной основы и фурано-эпоксидного покрытия соответственно, МПа;  $G_o$ ,  $G_n$  – модули сдвига субстрата и полимерного покрытия, МПа;  $2H$ ,  $h$  – толщины основы и полимерного покрытия, м;  $2l$  – длина покрытия, м;  $p$  – нагрузка, прикладываемая к стальной основе (варьировалась в пределах 1–10 МПа).

Анализ данных рис.1 показывает, что  $\tau_{\max}$  в некоторой мере зависит от типа полимерного компонента, а, следовательно, и модуля упругости покрытия  $E_n$ . Уровень  $\tau_{\max}$  исследованных систем достаточно невысок, не превышает 0, 25 МПа. Снижая модуль упругости фурано-эпоксидного покрытия (т.е. «эластифицируя» полимерную матрицу различными модификаторами, например КУС), можно уменьшить касательные напряжения, воздействие которых, как правило, приводит к отслоению полимерного покрытия, и позволяет увеличить его прочностные, деформационные и эксплуатационные характеристики.

Зависимость для оценки максимальных нормальных напряжений в полимерном покрытии  $\sigma_n$ , возникающих при краткосрочном или постоянном нагружении стальной основы (рис. 2) имеет вид [12]:

$$\sigma_n = p \frac{L}{E_o \cdot k^2 \cdot h} \left( 1 - \frac{1}{chkl} \right).$$

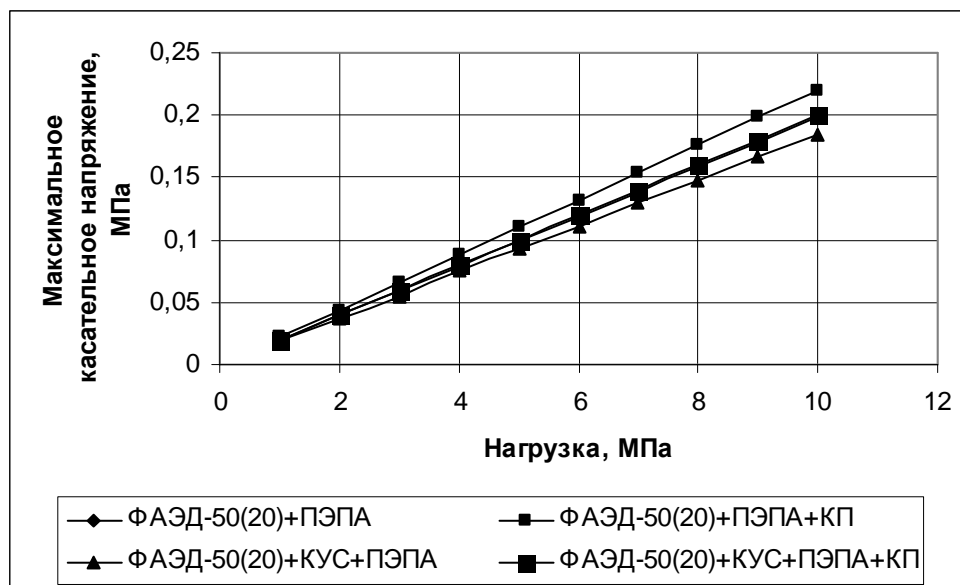


Рисунок 1 – Зависимость  $\tau_{\max}$  для исследованных композитов при различных уровнях нагрузки стальной основы

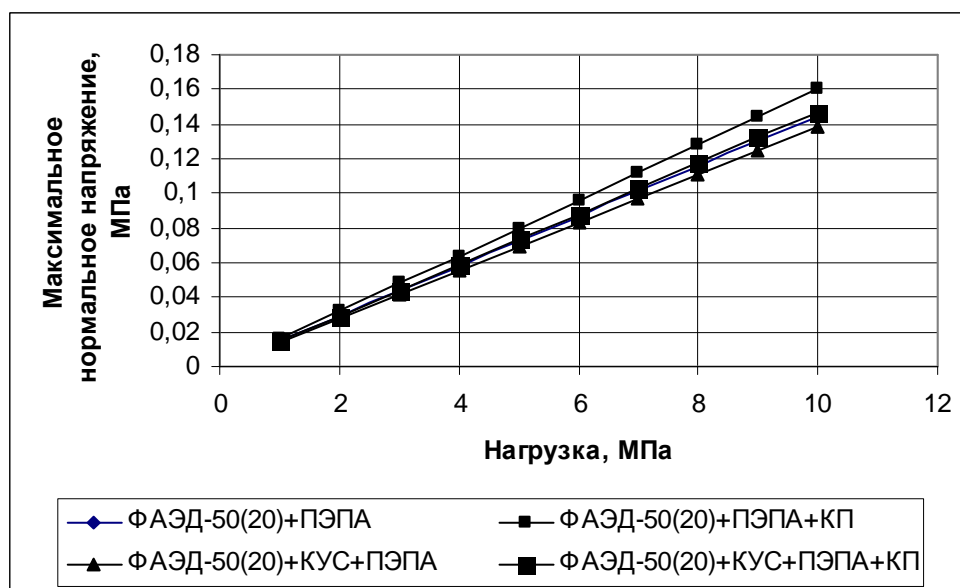


Рисунок 2 – Зависимость  $\sigma_n$  для фурано-эпоксидных покрытий от уровня внешнего воздействия

Как видно из рис. 2, уровень максимальных нормальных напряжений  $\sigma_n$  в исследованных фурано-эпоксидных покрытиях в среднем на 25 % ниже  $\tau_{\max}$  и также зависит от типа полимерного композита.

Уровень максимальных нормальных напряжений  $\sigma$  в стальной основе под фурано-эпоксидным покрытием (табл. 3) можно определить из соотношения [13]:

$$\sigma = p \left( 1 - \frac{L}{E_o \cdot k^2 \cdot H} \left( 1 - \frac{1}{chkl} \right) \right)$$

Анализ данных, представленных на рис. 1–2 и табл. 3, показал, что, снижая модуль упругости фурано-эпоксидного покрытия  $E_n$ , можно уменьшить также  $\sigma_n$ , которые, как правило, вызывают его коге-

зионное разрушение. Повышение модуля упругости исследованных полимерных покрытий в результате введения в состав композитов дисперсных наполнителей (например, КП) в некоторой мере снижает уровень нормальных напряжений  $\sigma$  в стальной основе. Таким образом, данный факт необходимо учитывать при проектировании стальных элементов конструкций и изделий строительного назначения с фурано-эпоксидными покрытиями.

Таблица 3 – Максимальные нормальные напряжения под полимерным покрытием

Композит	Значение $\sigma$ (МПа) при нагрузке $p$ (МПа)				
	1	3	5	7	10
ФАЭД-50(20) + ПЭПА	0,990	2,970	4,950	6,930	9,900
ФАЭД-50(20) + ПЭПА + КП	0,987	2,961	4,935	6,909	9,870
ФАЭД-50(20) + КУС + ПЭПА	0,989	2,967	4,945	6,923	9,870
ФАЭД-50(20) + КУС + ПЭПА + КП	0,988	2,964	4,940	6,916	9,880

Полимерное покрытие может также «разгружать» стальную основу и тем самым повышать ее несущую способность и долговечность. Т.е., при проектировании строительных систем «стальная основа – фурано-эпоксидное покрытие» необходимо стремиться к оптимальному сочетанию, чтобы полимерное покрытие, с одной стороны, повышало несущую способность стальной основы, а с другой стороны – не испытывало критических нагрузок и деформаций, приводящих к нарушению сплошности исследованных покрытий, а, следовательно, и к потере их функциональных (защитных антикоррозионных) свойств.

Регулируя параметры технологического процесса формирования фурано-эпоксидного покрытия (рецептуру, температуру и время структурирования ФАЭД и ФЭО, порядок совмещения ингредиентов композиционной системы и др.) можно достичь как скачкообразного, так и плавного изменения градиента модуля упругости системы по толщине исследованных покрытий. В случае скачкообразного изменения модуля упругости слоев на границе раздела «полимерное покрытие – субстрат» при нагружении стальной основы возникают значительные касательные напряжения, которые, как правило, приводят к отслоению верхнего слоя фурано-эпоксидного покрытия. Поэтому при формировании покрытия целесообразно, чтобы модуль упругости элементов покрытия по его толщине изменялся монотонно. Т.е., целесообразно для данных случаев формировать так называемые градиентные покрытия. С технологической точки зрения для фурано-эпоксидных композитов данный подход является приемлемым.

**Выводы.** В результате проведенных исследований установлено существенное влияние структурно-реологических свойств (параметры связности – несвязности дисперсных систем), химической природы поверхности (наличие и концентрация кислотно-основных Бренстедовских центров), гранулометрического состава исследованных дисперсных наполнителей (КП, КН, ПК, КК, ГР) на деформационно-прочностные (внутренние напряжения) характеристики фурано-эпоксидных полимерных материалов.

Таким образом, проведенный комплекс исследований свойств дисперсных наполнителей и фурано-эпоксидных композиций, содержащих анализируемые дисперсные системы, позволяет рекомендовать разработанные фурано-эпоксидные композиционные материалы для защиты строительных изделий и конструкций на металлической основе.

#### Литература

1. Алимухамедов М.Г. Фурановые соединения как мономеры для получения полимеров (обзор) // Пласт.массы.–1995.– №3.– С. 3–5.
2. Алимухамедов М.Г. Современное состояние и пути развития синтеза поликонденсационных фурановых олигомеров (обзор) // Пласт. массы.– 1995.–№6.– С. 3–11.
3. Практикум по полимерному материаловедению / Под ред.П.Г. Бабаевского.– М.: Химия, 1980.– 256 с.
4. Градус Л.Я. Руководство по дисперсионному анализу методом микроскопии.– М.: Химия, 1979. – 232 с.

5. Ван Кревелен Д.В. Свойства и химическое строение полимеров / Пер. с англ. Под ред. А.Я. Малкина.–М.: Химия, 1976.– 415 с
6. Урьев Н.Б., Потанин А.А. Текучесть суспензий и порошков.– М.: Химия, 1992. – 256 с.
7. Урьев Н.Б. Высококонцентрированные дисперсные системы.– М.: Химия, 1980.– 320 с.
8. Комохов П.Г., Шангина Н.Н. Конструирование композиционных материалов на неорганических связующих с учетом активных центров поверхности наполнителя // Вестник отделения строительных наук РАСХН.–1996. № 1.– С. 31.
9. Недилько С.А., Попель П.П. Общая и неорганическая химия: Сборник задач.– К.: Вища школа.– 1988.– 256 с.
10. Рабинович В.А., Хавин З.Я. Краткий химический справочник. Изд. 2-е, испр. и доп.– М.: Химия, 1978.– 392 с.
11. Задачи и упражнения по общей химии: Учеб. пособие Б.И. Адамсон, О.Н. Гончарук, В.Н. Камышова и др.; Под ред. Н.В. Коровина. – М.: Высш. школа, 2003.– 255 с.
12. Уманский Э.С., Ляшенко Б.А. Условия адгезионной и когезионной равнопрочности жаростойких покрытий // Косм. Исследования на Украине.–1975.– Вып 6.– С. 58–64.
13. Долгов Н.А. Влияние модуля упругости покрытия на работоспособность системы основа – покрытие // Проблемы прочности.– 2002.–№ 2.– С. 66–72.

Bibliography (transliterated)

1. Alimuhamedov M.G. Furanovye soedinenija kak monomery dlja poluchenija polimerov (obzor) Plast.massy.–1995.– #3.– p. 3–5.
2. Alimuhamedov M.G. Sovremennoe sostojanie i puti razvitiya sinteza polikondensacionnyh furanovyh oligomerov (obzor) Plast. massy.– 1995.–#6.– p. 3–11.
3. Praktikum po polimernomu materialovedeniju / Pod red.P.G. Babaevskogo.– М.: Himija, 1980.– 256 p.
4. Gradus L.Ja. Rukovodstvo po dispersionnomu analizu metodom mikroskopii.– М.: Himija, 1979. – 232 p.
5. Van Krevelen D.V. Svojtva i himicheskoe stroenie polimerov / Per. s angl. Pod red. A.Ja. Malkina.– М.: Himija, 1976.– 415 p
6. Ur'ev N.B., Potanin A.A. Tekuchest' suspenzij i poroshkov.– М.: Himija, 1992. – 256 p.
7. Ur'ev N.B. Vysokokontcentrirovannye dispersnye sistemy.– М.: Himija, 1980.– 320 p.
8. Komohov P.G., Shangina N.N. Konstruirovanie kompozicionnyh materialov na neorganicheskih svjazujushhijh s uchetom aktivnyh centrov poverhnosti napolnitelja Vestnik otdelenija stroitel'-nyh nauk RASSN.–1996. # 1.– p. 31.
9. Nedil'ko S.A., Popel' P.P. Obshhaja i neorganicheskaja himija: Sbornik zadach.– К.: Vishha shko-la.– 1988.– 256 p.
10. Rabinovich V.A., Havin Z.Ja. Kratkij himicheskij spravochnik. Izd. 2-e, ispr. i dop.– М.: Himija, 1978.– 392 p.
11. Zadachi i uprazhnenija po obshhej himii: Ucheb. posobie B.I. Adamson, O.N. Goncharuk, V.N. Kamysheva i dr.; Pod red. N.V. Korovina. – М.: Vyssh. shkola, 2003.– 255 p.
12. Umanskij Je.S., Ljashenko B.A. Uslovija adgezionnoj i kogezionnoj ravnoprochnosti zharo-stojkih pokrytij Kosm. Issledovanija na Ukraine.–1975.– Vyp 6.– p. 58–64.
13. Dolgov N.A. Vlijanie modulja uprugosti pokrytija na rabotosposobnost' sistemy osnova – pokrytie Problemy prochnosti.– 2002.–# 2.– p. 66–72.

УДК 678.5:621.793:620.172

Рассоха О.М., Черкашина Г.М., Юрченко Г.О.

**ФУРАНО-ЕПОКСИДНІ ПОКРИТТЯ ДЛЯ БУДІВЕЛЬНОЇ ІНДУСТРІЇ**



В статті наведені експериментальні данні про структурні, поверхневі властивості та гранулометричний склад дисперсних наповнювачів (кварцовий пісок, каолін, периклаз, карбонат кальцію, графіт) та проаналізовано їх вплив на деформаційно-міцнісні властивості фурано-епоксидних композиційних покриттів.

Rassokha O.M., Cherkashyna G.M., Yurchenko G.O.

**FURANE-EPOXIDE COVERS FOR BUILDING MATERIALS INDUSTRY**

The experimentally obtained data of structural, surface properties and granulometric containing of disperse-type fillers (quartz sand, caolyne, peryklaz, calcium carbonate, graphite) were presented and their influence on mechanical properties of furane-epoxide covers was analyzed.

Ганжа А.Н., Братута Э.Г., Марченко Н.А.

**УТОЧНЕННАЯ МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛОВОЙ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ СИСТЕМЫ ОТОПЛЕНИЯ С УЧЕТОМ НЕРАВНОМЕРНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ**

**Введение и постановка задачи.** В настоящее время в системах отопления зданий, построенных до начала 90-х годов на территории СНГ, широко распространены системы отопления, где применяются стандартные приборы отопления: радиаторы, конвекторы типа "Аккорд" или "Комфорт" и др. При этом в основном применяется качественное регулирование подачи теплоты потребителям. В проектных расчетах систем отопления приборы подбирались исходя из тепловой нагрузки здания с учетом нагрузок помещений. Однако, при проектировании не всегда учитывались различия в температурах теплоносителя на входе в каждый отопительный прибор, так как при подаче теплоносителя по стояку, например, "сверху-вниз", эта температура будет постепенно уменьшаться от верхнего этажа к нижнему. Различие в предполагаемой температуре теплоносителя для каждого этажа будет приводить к различиям тепловой производительности отопительных приборов и, следовательно, – различиям температуры воздуха внутри помещений каждого этажа по стояку. Это приводит к снижению качества теплоснабжения квартир, расположенных в основном на нижних этажах. Во время постоянных перебоев с поставками газа в начале 90-х годов ввиду ухудшения качества теплоснабжения произошли неконтролируемые переделки внутридомовых систем путем добавления приборов отопления в основном на нижних этажах. При возврате к нормальным уровням температур теплоносителя на этих стояках происходит перерасход тепловой энергии. При увеличении расхода теплоносителя по стояку по сравнению с расчетным происходит также перерасход теплоты (перетоп) и увеличение температуры внутри помещений. Одной из задач энергетического аудита систем отопления является поиск мест, где происходит перерасход теплоты или некачественный ее отпуск [1]. В работе поставлена задача: разработать уточненную методику для определения фактической тепловой производительности отопительных приборов и системы отопления в целом с учетом неравномерности распределения параметров теплоносителя и внутреннего воздуха, а также осуществленных переделок.

**Решение.** При расчете тепловой производительности системы отопления обычно используют такую зависимость [2, 3]:

$$Q_0 = \varepsilon \cdot W_m \cdot \nabla, \tag{1}$$

где  $Q_0$  – тепловая производительность;  $W_m$  – меньшее значение водяного эквивалента теплообмениваемых сред;  $\nabla$  – максимальная разность температур между средами (теплоносителем и воздухом на входе);  $\varepsilon$  – безразмерная удельная тепловая производительность. Традиционно для ее определения используется преобразованная эмпирическая формула [2, 3]:

$$\varepsilon = \frac{1}{\frac{0,5 + \mu}{1 + \mu} + \frac{1}{\omega}}, \tag{2}$$

где  $\omega$  – параметр,  $\omega = \frac{k \cdot F}{W_m}$ ,  $k$  и  $F$  – коэффициент теплопередачи и площадь теплопередачи всех отопительных приборов стояка;  $\mu$  – коэффициент смешения в смесительном устройстве (элеваторе).

Эта формула справедлива для стояка системы отопления в целом и не учитывает неравномерность распределения температур теплоносителя и воздуха по этажам.

Для отопительных приборов величина  $k \cdot F$  определяется по обобщенной формуле [2, 3]:

$$k \cdot F = \Phi \cdot \left( \frac{Q_0}{Q_0'} \right)^{\frac{n}{1+n}}, \tag{3}$$

где  $\Phi$  – параметр теплообменника, величина постоянная,  $\Phi = 7,844 \cdot F_{\text{ЭКМ}}$ ;  $F_{\text{ЭКМ}}$  – число эквивалентных квадратных метров отопительных приборов. Эквивалентный квадратный метр – это площадь нагревательного прибора, отдающего в 506 Вт, при средней разности температуры теплоносителя и воздуха 64,5°C и расходе воды через прибор 17 кг/ч [4];  $Q_0'$  – расчетная тепловая производительность приборов отопления;  $n$  – показатель степени, для радиаторов  $n = 0,25$ ; конвекторов  $n=0,2$  [2-4].

Тепловая производительность отдельного отопительного прибора определяется по зависимости:

$$Q_0 = 506 \cdot F_{\text{ЭКМ}} \cdot \varphi_1, \quad (4)$$

где  $\varphi_1$  – коэффициент, учитывающий изменение температурного напора [4].

Разработана уточненная методика расчета безразмерной удельной тепловой производительности отопительных приборов – конвекторов типа "Аккорд" или "Комфорт" и радиаторов (см. рис. 1), которая входит в общий алгоритм расчета системы отопления.

Для аппаратов воздушного охлаждения (АВО), воздухоподогревателей ГТУ, воздухоохладителей компрессоров, калориферов подробная расчетная схема, математическая модель и методика приведены в работах [5 и др.]. Составлена обобщенная расчетная схема отопительного прибора (см. рис.2). Согласно особенностям компоновки приборов движение теплоносителей – сложное смешанное многоходовое, как правило, с общим противотоком. Среда, которая движется внутри труб (вода), перемешивается в пределах одного ряда труб, между ходами и секциями. Наружная среда (воздух) перемешивается при движении между ребрами (см. рис. 2). Таким образом, как воздух, так и вода движутся отдельными струями, число которых конечно.

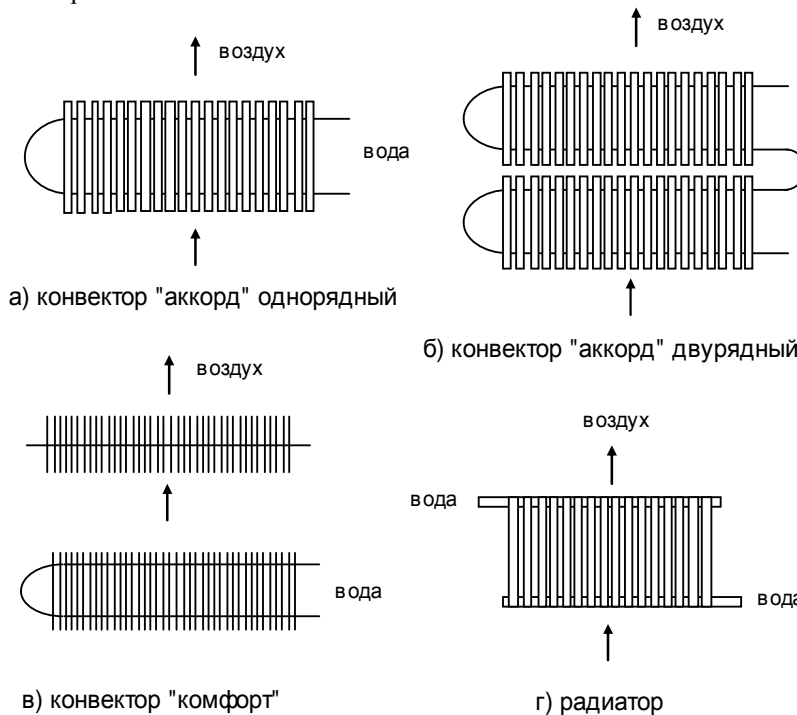


Рисунок 1 – Основные приборы отопления

Авторы полагают, что элементами, из которых скомпонован теплообменник, являются простейшие схемы однократного перекрестного тока с полным перемешиванием обоих теплоносителей по ходу. Следует отметить, что большинство традиционных подходов к дискретному расчету теплообменников предусматривает разбивку поверхности на большое число элементов (конечных разностей) [6], где, как правило, не учитываются особенности движения сред в элементах. В предложенной авторами методике эффективность каждого перекрестноточного элемента из рис. 2 и температуры теплоносителей на выходе из элементов будут выражаться следующим образом [5, 7]:

$$P_3 = \frac{1}{\frac{1}{1 - e^{-NTU_{23}}} + \frac{R_3}{1 - e^{-R_3 \cdot NTU_{23}}} - \frac{1}{NTU_{23}}}; \quad (5)$$

$$t_{B_2\text{э}} = t_{B_1\text{э}} + P_3(t_{T_1\text{э}} - t_{B_1\text{э}}) \text{ и } t_{T_2\text{э}} = t_{T_1\text{э}} - P_3 R_3(t_{T_1\text{э}} - t_{B_1\text{э}}), \quad (6)$$

где "э" – индекс, обозначающий, что параметры определяются в элементе; "1" – вход среды, "2" – выход среды; "в" – воздух, "т" – теплоноситель (вода);  $R$  и  $NTU_2$  – отношение водяных эквивалентов и число единиц переноса теплоты [5, 7],  $R = \frac{W_B}{W_T}$ ,  $NTU_2 = \frac{K \cdot F}{W_B}$ .

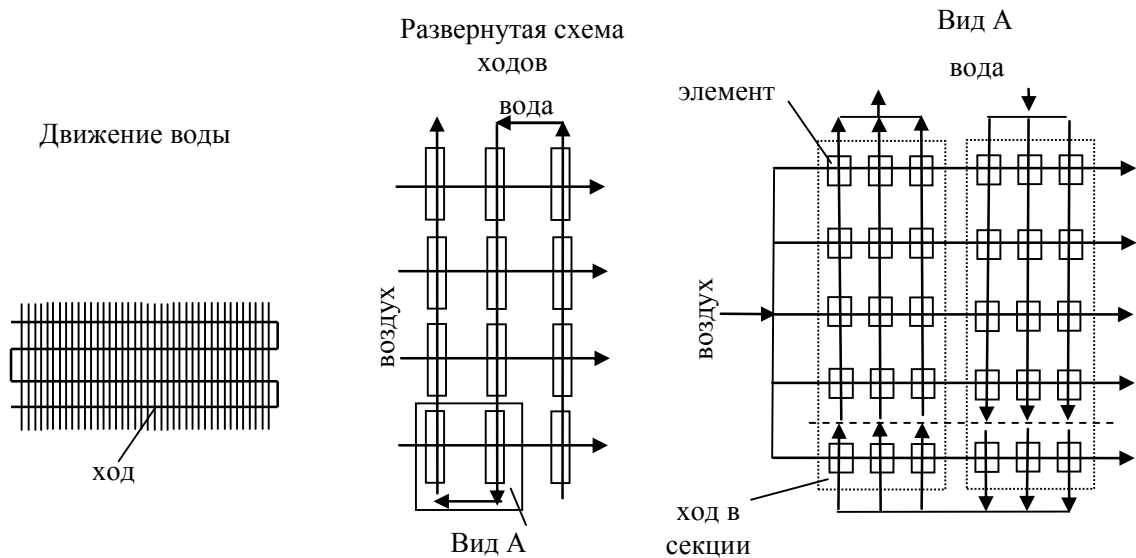


Рисунок 2 – Обобщенная расчетная схема отопительного прибора

Так как схема движения противоточная, то для уточнения эффективностей элементов используется интервально-итерационный метод. На каждом приближении свойства сред в элементах определяются по их усредненным температурам.

В итоге безразмерная удельная тепловая производительность отопительного прибора будет определяться так:

$$\varepsilon = \frac{\tau_{o1} - \tau_{o2}}{\nabla} \text{ и } \omega = R \cdot NTU_2, \text{ если } W_M = W_T; \quad \varepsilon = \frac{\tau_{o1} - \tau_{o2}}{R \cdot \nabla} \text{ и } \omega = NTU_2, \text{ если } W_M = W_B, \quad (7)$$

где  $\tau_{o1}$  и  $\tau_{o2}$  – температуры теплоносителя на входе и выходе из отопительного прибора, °С.

Общий алгоритм определения основывается на поиске тепловой производительности для прибора отопления на каждом этаже по стояку с увязкой формул (1), (3) и (4). При этом безразмерная тепловая производительность прибора отопления считается не по зависимости (2), а по созданному алгоритму дискретного расчета. В систему уравнений дополнительно входит связь между расчетными и фактическими тепловыми нагрузками:

$$\frac{Q_o}{Q_o'} = \frac{t_B - t_H}{t_B' - t_H'}, \quad (8)$$

где  $t_B$ ,  $t_H$  и  $t_B'$ ,  $t_H'$  – фактические и расчетные температуры внутреннего и наружного воздуха.

В результате для каждого этажа определяется фактическая тепловая производительность прибора отопления и расход циркулирующего воздуха через него. С помощью этих параметров определяется фактическая температура воздуха на выходе из нагревательного прибора и внутри помещения, температура теплоносителя на выходе. Исходными данными являются расход и температура теплоносителя на входе в систему из температурного графика, температура наружного воздуха, эквивалентный квадратный метр прибора отопления на каждом этаже. Тепловая производительность всей системы определяется как сумма производительностей всех приборов.

Сделан анализ для стояка системы отопления 9 этажного здания с приборами отопления в виде однорядных конвекторов "Аккорд" А20 с площадью 1 экв.кв.м. на каждом этаже и подачей теплоносителя "сверху-вниз". Расчет сделан в двух вариантах: с расчетным расходом воды через приборы по графику качественного регулирования и превышением этого расхода в 2 раза. Дополнительно сделан расчет при замене на 1 и 2 этажах приборов отопления на двурядные конвекторы "Аккорд" 2А16 с площадью 1,47 экв.кв.м. Температура наружного воздуха принималась расчетной для г. Харьков – 23 °С, температура теплоносителя на входе в систему отопления 95°С. Результаты приведены на рис.3 а.

Из анализа результатов видно, что в обоих случаях существует неравномерность распределения тепловых потоков по этажам. В первом случае тепловой поток на верхнем этаже составил 564 Вт, на нижнем – 447°Вт. Температура внутреннего воздуха на нижних этажах ниже нормативной. Тепловая нагрузка всего стояка и усредненная температура внутреннего воздуха по этажам равняются проектным значениям. В случае превышения расхода теплоносителя в 2 раза тепловой поток на нижнем этаже равняется проектному 506 Вт, а на верхнем – 569 Вт. Соответственно температура внутри помещений на нижнем этаже составляет 18 °С, а на верхнем 23°С. В этом случае перерасход тепловой энергии равняется 6 % от расчетного. В третьем случае, когда существуют неконтролируемые переделки, наблюдается большая неравномерность распределения температур по этажам. Температура внутреннего воздуха на 1 и 2 этаже увеличилась до 21+23°С, хотя на 3 и 4 этажах она осталась ниже нормы. При этом перерасход тепловой энергии составил 4 % от расчетного.

На рис. 3 б приведены результаты расчета рекомендуемого перераспределения площади отопительных приборов по этажам при условии, чтобы температура воздуха внутри помещений всех этажей была проектной (т.е. 18 °С), для чего был разработан отдельный алгоритм.

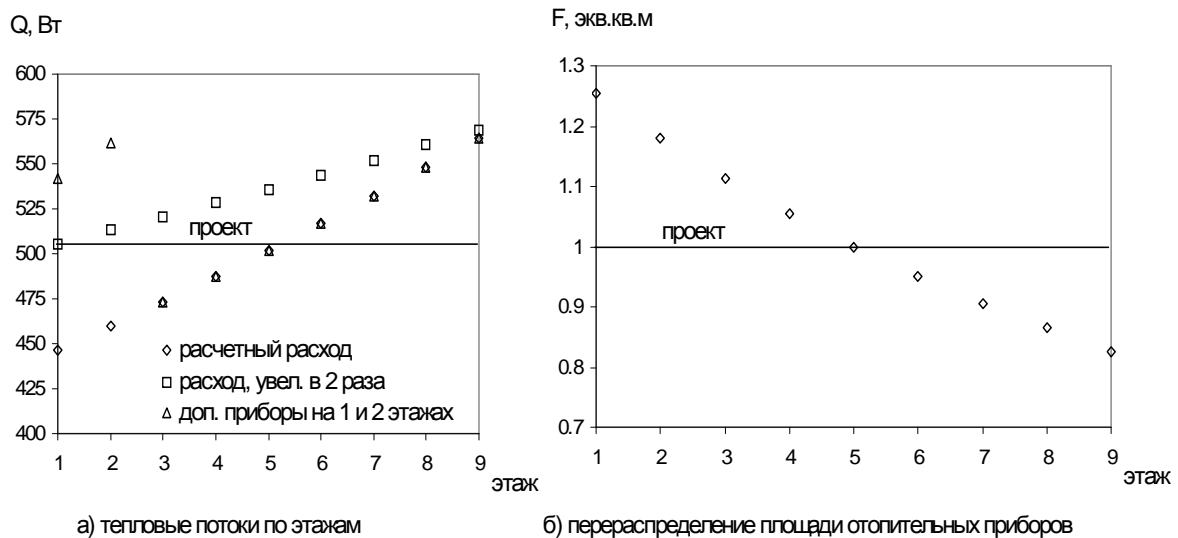


Рисунок 3 – Распределение параметров по этажам

**Выводы.** Создана уточненная методика для определения фактической тепловой производительности отопительных приборов и системы отопления в целом с учетом неравномерности распределения параметров теплоносителя и внутреннего воздуха, а также осуществленных переделок. С помощью разработанной методики при проведении энергетического аудита систем теплоснабжения можно определить тепловую производительность систем отопления, выявить места и уровень перерасхода теплоты и некачественного его отпуска, а также выработать рекомендации по модернизации. После некоторых работ можно учесть и другие факторы: теплоотдачу от стояков внутрь помещений, нарушение гидравлического режима в результате переделок и пр.

Литература

1. Энергозбереження. Енергетичний аудит промислових підприємств. ДСТУ 4713-2007. – [Чинний від 2007-07-01]. — К.: Держспоживстандарт України, 2007. – 16 с. – (Національні стандарти України).
2. Теплотехнический справочник: В 2 т./Под общей ред. В.Н. Юренева и П.Д. Лебедева.– М.: Энергия, 1975.– Т.1. – 744 с.
3. Промышленная теплоэнергетика и теплотехника/Под. общ. ред. В.А. Григорьева и В.М. Зорина.– М.: Энергоатомиздат, 1983. – 552 с.
4. Справочник по наладке и эксплуатации водяных тепловых сетей. – М.: Стройиздат, 1988 – 216 с.
5. Братута Э.Г., Ганжа А.Н., Марченко Н.А. Аналіз ефективності калориферного підігріву повітря у системах опалення, вентиляції та кондиціювання//Зб. наук. праць 5-ї Міжнародної науково-практичної конференції "Проблеми економії енергії".– Львів, НУ "Львівська політехніка", 23–24 жовтня 2008, – С. 274–27
6. Таран В.Н. Расчет многопоточного теплообменника нелинейной прогонкой // Технические газы, 2008. – С. 34–40.
7. Справочник по теплообменникам: Пер. с англ.: В 2 т./Под ред. Б.С. Петухова, В.К. Шикова.– М.: Энергоатомиздат, 1987.– Т.1. – 560 с.

Bibliography (transliterated)

1. Energozberzhennja. Energetichnij audit promislovih pidpriemstv. DSTU 4713 2007. – [Chin-nij vid 2007-07-01]. — K.: Derzhspozhivstandart Ukraïni, 2007. – 16 p. – (Nacional'ni standarti Ukraï-ni).
2. Teplotehničeskij spravochnik: V 2 t./Pod obshhej red. V.N. Jureneva i P.D. Lebedeva.– M.: Jenergi-ja, 1975.– T.1. – 744 p.
3. Promyshlennaja teplojenergetika i teplotehnika/Pod. obshh. red. V.A. Grigor'eva i V.M. Zorina.– M.: Jenergoatomizdat, 1983. – 552 p.
4. Spravochnik po naladke i jekspluataciji vodjanyh teplovyh setej. – M.: Strojizdat, 1988 – 216 p.
5. Bratuta Je.G., Ganzha A.N., Marchenko N.A. Analiz efektivnosti kalorifer'nogo pidigrivu povitryja u sistemah opalennja, ventiljacii ta kondicijuvannja Zb. nauk. prac' 5-i Mizhnarodnoï naukovopraktičnoï konferencii "Problemi ekonomii energii".– L'viv, NU "L'vivs'ka politehnika", 23–24 zhovtnja 2008, – p. 274–27
6. Taran V.N. Raschet mnogopotocnogo teploobmennika nelinejnoj progonkoj Tehničeskije ga-zy, 2008. – p. 34–40.
7. Spravochnik po teploobmennikam: Per. s angl.: V 2 t./Pod red. B.S. Petuhova, V.K. Shikova.– M.: Jenergoatomizdat, 1987.– T.1. – 560 p.

УДК 697.34:66.045.1

Ганжа А.М., Братута Е.Г., Марченко Н.А.

**УТОЧНЕНА МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ ТЕПЛОВОЇ ПРОДУКТИВНОСТІ СИСТЕМИ ОПАЛЕННЯ З УРАХУВАННЯМ НЕРІВНОМІРНОСТІ РОЗПОДІЛУ ПАРАМЕТРІВ**

Створено уточнену методику для визначення фактичної теплової продуктивності опалювальних приладів і системи опалення в цілому з урахуванням нерівномірності розподілу параметрів теплоносія і внутрішнього повітря, а також здійснених переробок. За допомогою розробленої методики при проведенні енергетичного аудиту систем теплопостачання можна визначити фактичну теплову продуктивність систем опалення, виявити місця перевитрати теплоти і її неякісного відпуску, а також виробити рекомендації з модернізації.

Ganzha A.N., Bratuta E.G., Marchenko N.A.

**THE SPECIFIED METHODIC OF HEAT PRODUCTIVITY DEFINITION OF HEATING SYSTEM TAKING INTO ACCOUNT UNEVENNESS OF PARAMETERS DISTRIBUTION**

The specified methodic for definition of real heat productivity of heaters and heating system taking into account unevenness of parameters distribution of heat carrier and inner air and executed alterations is making. By means of making methodic at realization of energetic audit of heating system can determine real heat productivity of heating systems, reveal point of heat over-expenditure and its low-quality issue and work out modernization recommendation.

УДК 621:664(076)

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

### ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ИНТЕГРАЦИЯ ПРОЦЕССА ПРОИЗВОДСТВА ГИПОФОСФИТА НАТРИЯ

**Актуальность проблемы.** Проектирование тепловых систем, обеспечивающих минимальное потребление энергии промышленными предприятиями, является одной из наиболее сложных технических проблем, с которой приходится сталкиваться как при реконструкции промышленных установок, так и при их первоначальном проектировании.

В настоящее время обычно используются сети с последовательно расположенными теплообменниками [1–3]. Применение таких схем основывается на теории и практике противоточного теплообмена, гарантирующего плавность движущих сил, когда температура одного холодного теплоносителя меняется в сторону одного горячего теплоносителя, и наоборот. Эта идея совершенно необоснованно распространяется на синтез теплосетей, которые являются системами более высокого уровня, нежели одиночные теплообменники, и, как правило, теплоэнергетические сети, построенные на указанном принципе, не являются оптимальными с точки зрения потребления энергии и окупаемости [3].

Предприятия химической промышленности являются типичными производствами, реконструкция тепловых схем которых приносит определенную экономическую выгоду. Большинство процессов химической промышленности, которые разрабатывались в республиках бывшего СССР, а также и в современных странах СНГ имеют неглубокую теплоэнергетическую интеграцию или являются неинтегрированными вообще [1, 4]. Производство фосфорной кислоты и фосфорсодержащих соединений не являются исключением. Потребление энергии в этих процессах довольно высоко, что отражается на конечной себестоимости выпускаемой продукции.

**Постановка и цель исследования.** В настоящей работе, с помощью пинч-проектирования выполнен проект системы рекуперации тепловой энергии в процессе производства гипофосфита натрия, благодаря которой производство будет работать в оптимальном режиме в широком диапазоне изменения стоимости энергии.

**Экстракция потоковых данных.** Рассмотрим технологическую схему производства гипофосфита натрия. Этот процесс является сложной химико-технологической системой, которая включает в себя химические реакции, систему разделения полученных продуктов, систему внешних энергоносителей, но система рекуперации тепловой энергии в этом производстве отсутствует. 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 принципиальной схемы производства гипофосфита натрия (рис. 1) сразу видно отсутствие системы рекуперации тепловой энергии. Проанализируем теплоэнергетическую эффективность такой системы и оценим возможность построения интегрированного производства, используя методы пинч-анализа.

Используя данные технологического регламента и литературные и справочные данные, а также интервьюирование технологов и проектировщиков, были установлены параметры технологических потоков, которые могут быть включены в интеграцию.

Поток №1 – охлаждение после последующего реактора R5. Поток охлаждается в последующем реакторе после окончания реакции и подается на фильтрацию.  $T_S = 90 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $T_T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $G = 22,08 \text{ т/ч}$ .

Поток №2 – охлаждение раствора после выпаривания. Раствор перед подачей на фильтрацию после выпаривания охлаждается.  $T_S = 90 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $T_T = 40 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $G = 5,63 \text{ т/ч}$ .

Поток №3 – конденсация паров при выпаривании. Пары из выпарного аппарата выбрасываются в атмосферу.  $T = 110 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $G = 6,89 \text{ т/ч}$ .

Поток №4 – конденсат паров выпарного аппарата. Теплота потока не используется.  $T_S = 110 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $T_T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $G = 6,89 \text{ т/ч}$ .

Поток №5 – отработанные газы сушильного барабана №1. Поток из сушильного барабана выбрасывается в атмосферу.  $T_S = 60 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $T_T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $G = 77,14 \text{ т/ч}$ .

Поток №6 – отработанные газы сушильного барабана №2. Поток из сушильного барабана очищается от пыли в скруббере и выбрасывается в атмосферу.  $T_S = 60 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $T_T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $G = 25,95 \text{ т/ч}$ .

Поток №7 – нагрев раствора  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . Раствор  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  нагревается в реакторе паром при перемешивании.  $T_S = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $T_T = 50 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $G = 9,76 \text{ т/ч}$ .

Поток №8 – нагрев суспензии  $\text{NaOH}-\text{Ca}(\text{OH})_2$ . Суспензия нагревается в реакторе паром при постоянном перемешивании.  $T_S = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $T_T = 50 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $G = 14,34 \text{ т/ч}$ .



Поток №9 – приготовление фосфорного шлама. Фосфорный шлам нагревается в реакторе паром при перемешивании.  $T_S = 20\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $T_T = 75\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $G = 4,13\text{ т/ч}$ .

Поток №10 – разложение фосфорного шлама. Фосфорный шлам подается в основной реактор, смешивается с суспензией  $\text{NaOH}-\text{Ca}(\text{OH})_2$  и вся реакционная масса подогрывается паром.  $T_S = 50\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $T_T = 95\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $G = 25,30\text{ т/ч}$ .

Поток №11 – подогрев последующего реактора. Реакционная масса нагревается в последующем реакторе.  $T_S = 35\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $T_T = 90\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $G = 22,08\text{ т/ч}$ .

Поток №12 – воздух на сушку 1. Воздух подогрывается в калорифере паром и поступает в сушилку 1.  $T_S = 20\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $T_T = 80\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $G = 77,14\text{ т/ч}$ .

Поток №13 – подогрев перед выпариванием. Суспензия поступает в испаритель, где подогрывается паром до температуры кипения.  $T_S = 30\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $T_T = 110\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $G = 22,51\text{ т/ч}$ .

Поток №14 – испарение. В испарителе из суспензии испаряется лишняя влага.  $T = 110\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $G = 6,89\text{ т/ч}$ .

Поток №15 – воздух на сушку 2. Воздух подогрывается в калорифере паром и поступает в сушилку 2.  $T_S = 20\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $T_T = 80\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $G = 25,95\text{ т/ч}$ .

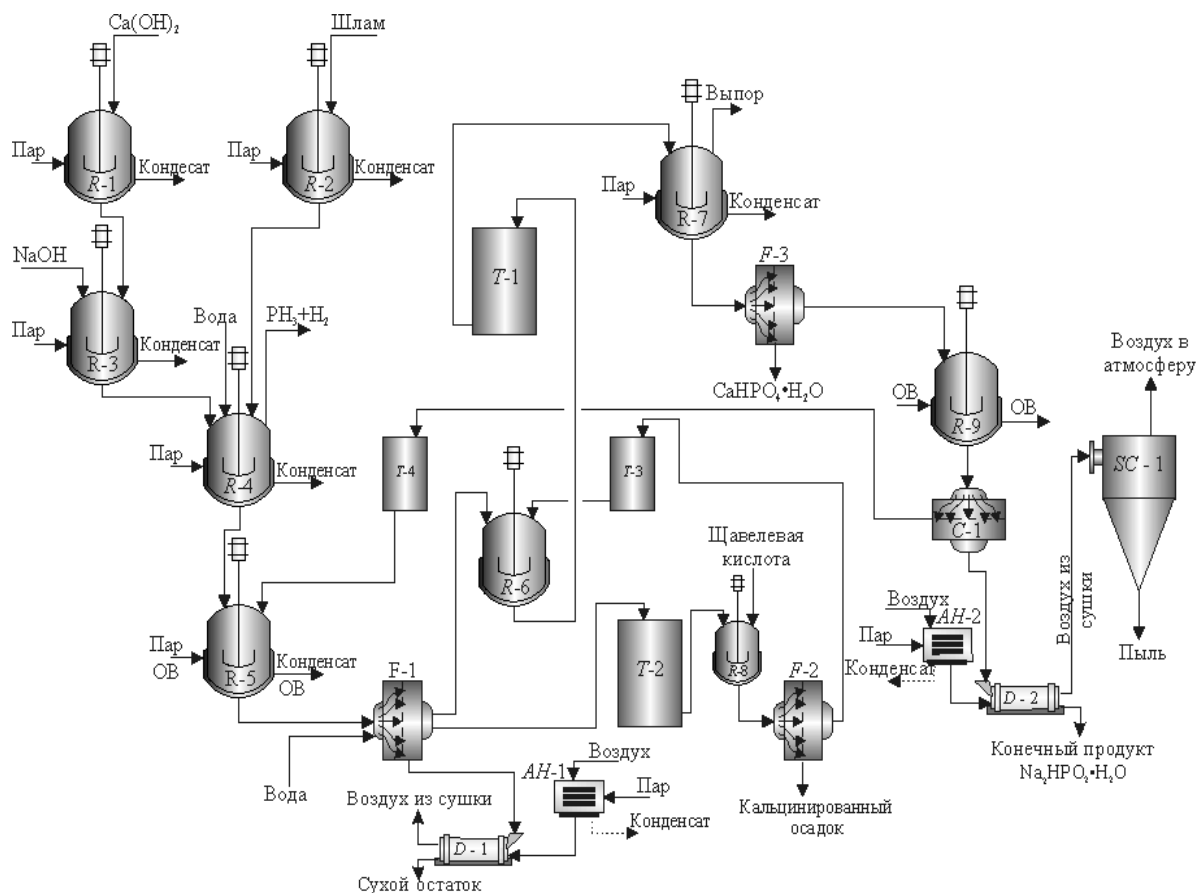


Рисунок 1 – Принципиальная технологическая схема производства гипофосфита натрия:  
 R1 – реактор подготовки  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ; R2 – реактор подготовки фосфорсодержащего шлама; R3 – подготовка  $\text{NaOH}-\text{Ca}(\text{OH})_2$ ; R4 – основной реактор; R5 – последующий реактор; R6 – нейтрализатор;  
 R7 – выпарка; R8 – осаждение щавелевой кислотой; R9 – кристаллизатор; F 1–3 – фильтр;  
 T 1–4 – емкость; C1 – центрифуга; SC1 – циклон; D 1,2 – сушка; AH 1,2 – подогреватель воздуха

Используя результаты изучения технологической схемы, регламента и материальный баланс установки, составим таблицу потоковых данных, необходимых для определения тепловой мощности, потребляемой предлагаемым процессом производства гипофосфита натрия (Таблица 1).

Таблица 1– Поточковые данные существующего процесса производства гипофосфита натрия

№	Поток	Тип	$T_c$ , °C	$T_h$ , °C	$G$ , т/ч	$C$ , кДж/(кг·К)	$r$ , кДж /кг	$CP$ , кВт/К	$\Delta H$ , кВт
1	Охлаждение после R5	гор	90	25	22,08	3,56		21,84	1420
2	Охлаждение после выпарки	гор	90	40	5,63	2,96		4,63	231,3
3	Конденсация паров	гор	110	110	6,89		2230		4266,0
4	Охлаждение конденсат	гор	110	25	6,89	4,19		8,02	681,3
5	Отработанный газ 1	гор	60	25	77,14	1,02		21,86	764,9
6	Отработанный газ 2	гор	60	25	25,95	1,02		7,35	257,3
7	Нагрев раствора Ca(OH) <sub>2</sub>	хол	20	50	9,76	3,35		9,09	272,8
8	Нагрев суспензии NaOH-Ca(OH) <sub>2</sub>	хол	20	50	14,34	3,35		13,36	400,7
9	Приготовление фосфорного шлама	хол	20	75	4,13	0,80		0,91	50,2
10	Разложение фосфорного шлама	хол	50	95	25,30	3,35		23,55	1059,9
11	Подогрев реактора R5	хол	35	90	22,08	2,93		17,99	989,3
12	Воздух на сушку 1	хол	20	80	77,14	1,02		21,86	1311,3
13	Подогрев перед выпариванием	хол	30	110	12,51	3,56		12,38	990,3
14	Испарение	хол	110	110	6,89		2230		4266,0
15	Воздух на сушку 2	хол	20	80	25,95	1,02		7,35	441,2

Построим популяцию горячих и холодных технологических потоков из таблицы 1 на сеточной диаграмме [1] в соответствии с температурными интервалами, в которых расположены исследуемые потоки. Сеточная диаграмма существующей сети теплообмена показана на рисунке 2.

Горячие утилиты в рассматриваемом процессе составляют величину 9 781 кВт, а холодные утилиты – 7 921 кВт. В качестве горячих утилит используется насыщенный глухой пар с температурой 130°C. Холодной утилитой в существующем процессе является охлаждающая вода оборотного цикла с начальной температурой 20°C.

**Пинч-проектирование.** Из рисунка 2 видно, что в системе отсутствует какая-либо рекуперация тепловой энергии между технологическими потоками. Отсюда можно сделать вывод, что для разработки оптимальной рекуперативной системы необходимо будет создать новую теплообменную сеть, используя основные принципы пинч-проектирования. Для этого сначала необходимо определить  $\Delta T_{\min}$  для создаваемой теплообменной сети и определить удельные стоимости теплообменной поверхности для каждого технологического потока, включаемого в интеграцию [1]. Стоимость поверхности будет зависеть от степени агрессивности среды, характера среды и наличия в ней примесей.

Сеточная диаграмма (рис. 2), построенная для технологической схемы процесса производства гипофосфита натрия (рис. 1), показывает, что предложенная реализация процесса не предполагает рекуперацию внутренней тепловой энергии технологических потоков.

Анализ технологического процесса и его схемы показал, что имеющиеся два основных реактора, четыре последующих реактора и две выпарные установки работают так, что в целом весь процесс можно рассматривать как непрерывный.

Это позволяет нам, используя данные из потоковой таблицы (табл. 1), построить составные кривые предлагаемого сейчас процесса производства гипофосфита натрия (рис. 3). Горячая составная кривая представляет собой суммарное изменение потокового теплосодержания горячих потоков в температурных интервалах, на которые делят термодинамическую систему технологических потоков их начальные и целевые значения температур. В данном случае это шесть горячих потоков (табл. 1).

Проекция горячей кривой на энтальпийную ось равна значению 7605,1 кВт – это та мощность, которую необходимо отвести от процесса для возможности его функционирования. В верхней части горячей составной кривой горизонтальный участок соответствует конденсации паров из выпарной установки. При конденсации выделяется мощность ~ 4,266 МВт.

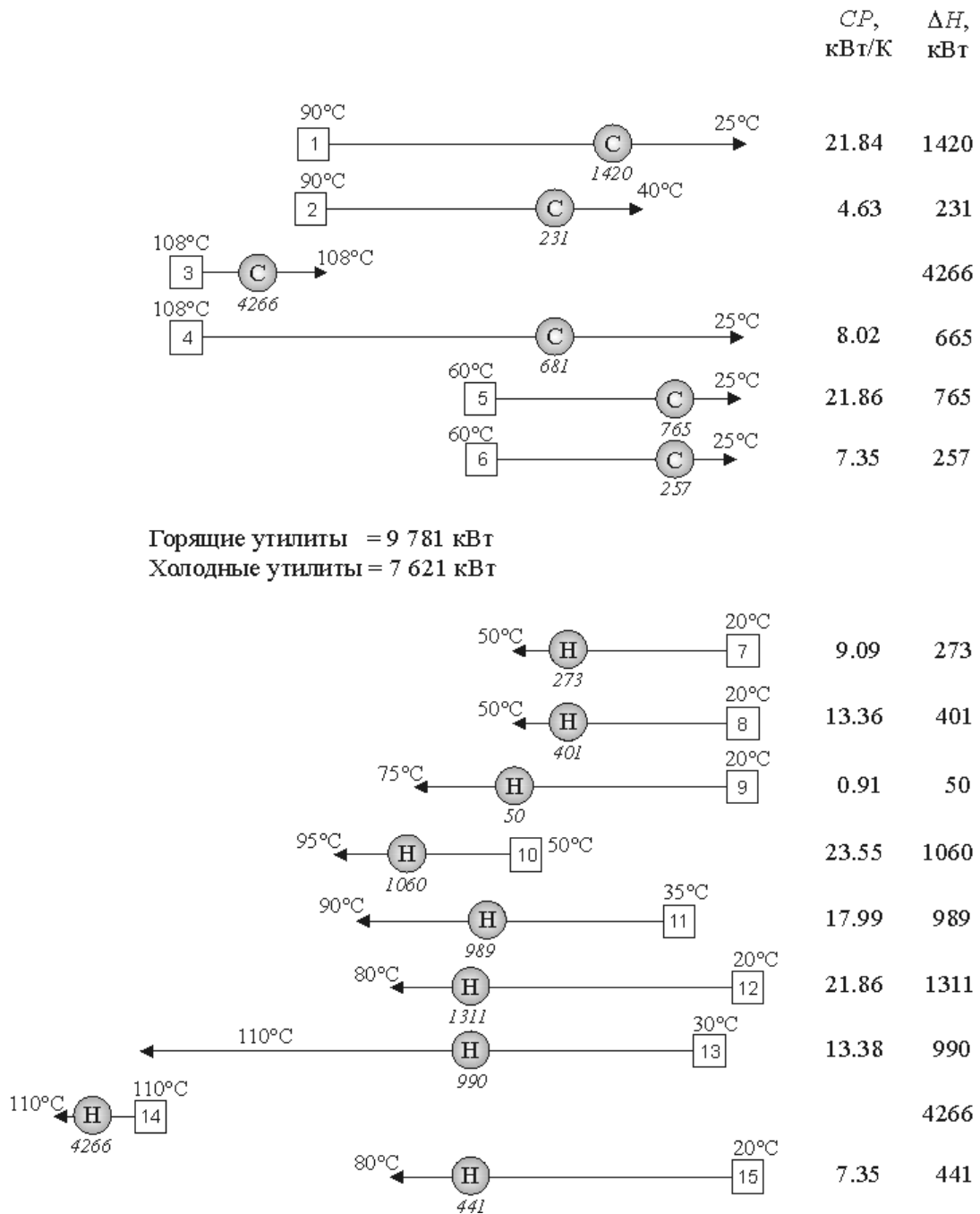


Рисунок 2 – Популяция технологических потоков процесса производства гипофосфита натрия, включенных в теплоэнергетическую интеграцию. 1–6 – горячие потоки; 7–17 – холодные потоки;  $CP$  – потоковая теплоемкость;  $\Delta H$  – изменение потокового теплосодержания

Проекция холодной составной кривой на энтальпийную ось составляет величину ~ 9782 кВт – это та полезная мощность, которую необходимо подвести к установке производства гипофосфита натрия для осуществления процесса. Характерной особенностью горячей кривой является её горизонтальный отрезок в верхней части (рис. 3), показывающий мощность, необходимую для выпаривания суспензии в выпарной установке и равную ~ 4,266 МВт.

Для того, чтобы экономически оптимально интегрировать рассматриваемый процесс, нам необходимо выяснить наиболее важные экономические значения, существенно влияющие на приведенную стоимость выполненного проекта.

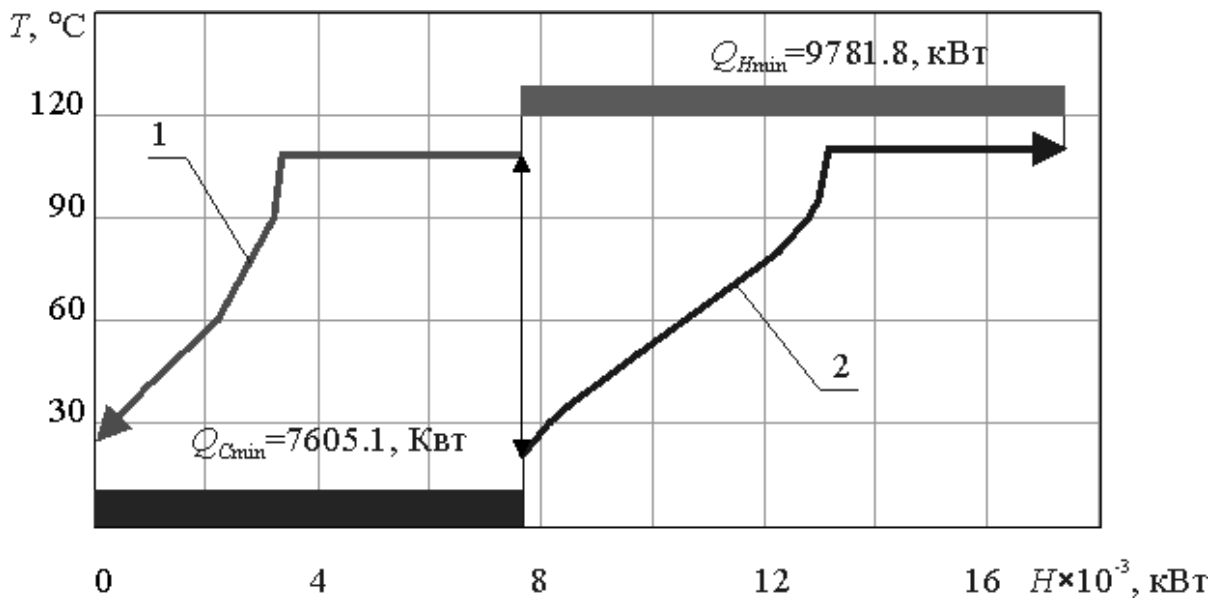


Рисунок 3 – Составные кривые предложенной технологической схемы процесса:  
 1 – горячая составная кривая; 2 – холодная составная кривая;  
 $Q_{Hmin}$  – горячие утилиты;  $Q_{Cmin}$  – холодные утилиты

Стоимость горячих утилит, использованных в процессе, примем равной 200 долл. США за 1 кВт год, что соответствует, примерно, 170 долл. США за 1000 м<sup>3</sup> природного газа, с учетом того, что в году 8000 рабочих часов.

Стоимость холодных утилит принимаем на порядок меньше, т.е. 0,1 стоимости горячих утилит [5], что дает значения 20 долл. США за 1 кВт год.

Удельная цена площади поверхности теплообмена принимается равной ~ 1000 долл. США/м<sup>2</sup>. Стоимость установки одного теплообменного аппарата с полной обвязкой и регулирующей арматурой равна ~ 10000 долл. США.

Будем считать, что для выполнения проекта предприятие берет в банке кредит сроком на 5 лет с 10 % кредитной ставкой.

Расчет дисконтированных величин стоимостей проекта процесса производства гипофосфита натрия позволяет определить значение минимальной разности температур между теплоносителями в будущей системе рекуперации тепловой энергии,  $\Delta T_{min} \approx 10^\circ\text{C}$  (рис. 4).

Более детальный анализ области локализации  $\Delta T_{min}$  показывает нам, что величина общей дисконтированной стоимости проекта в диапазоне изменения  $\Delta T_{min} \in 5...20^\circ\text{C}$  меняется незначительно (рис. 4).

Это означает, что производство гипофосфита натрия, построенное с системой теплообмена при  $\Delta T_{min}$ , выбранном из интервала 5...20<sup>o</sup>C, будет работать в экономически оптимальном режиме.

Стоит заметить, что интервал изменения  $\Delta T_{min}$  определен при выбранной стоимости энергии. Современные тенденции рынка энергоносителей говорят, что их стоимость в ближайшие несколько десятилетий будет возрастать. Поэтому рассмотрим зависимость  $\Delta T_{min}$  оптимального в системе рекуперации тепловой энергии рассматриваемого процесса от стоимости энергии.

Анализ зависимости  $\Delta T_{min}$  от стоимости энергии проведем при изменении стоимости горячих утилит в пределах от 100 долл. США за 1 кВт год до 400 долл. США за 1 кВт год. Изменение стоимости холодных утилит рассматривается в пределах 0,1 от изменения стоимости горячих утилит, то есть от 10 и до 40 долл. США за 1 кВт год.

Мы видим, что значительного изменения в локализации  $\Delta T_{min}$  при уменьшении стоимости энергии не происходит (рис. 5). Более детальный анализ зависимости  $\Delta T_{min}$  (стоимость энергии) показывает, что оптимальное значение  $\Delta T_{min}$  в пределах изменения стоимости утилит изменяется незначительно.

Более точный расчет зависимости оптимального  $\Delta T_{\min}$  от стоимости энергии показывает, что в пределах изменения стоимости энергии от 100 долл. США за 1 кВт год до 400 долл. США за 1 кВт год изменяется от  $\sim 18^\circ\text{C}$  до  $\sim 4^\circ\text{C}$  (рис. 6).

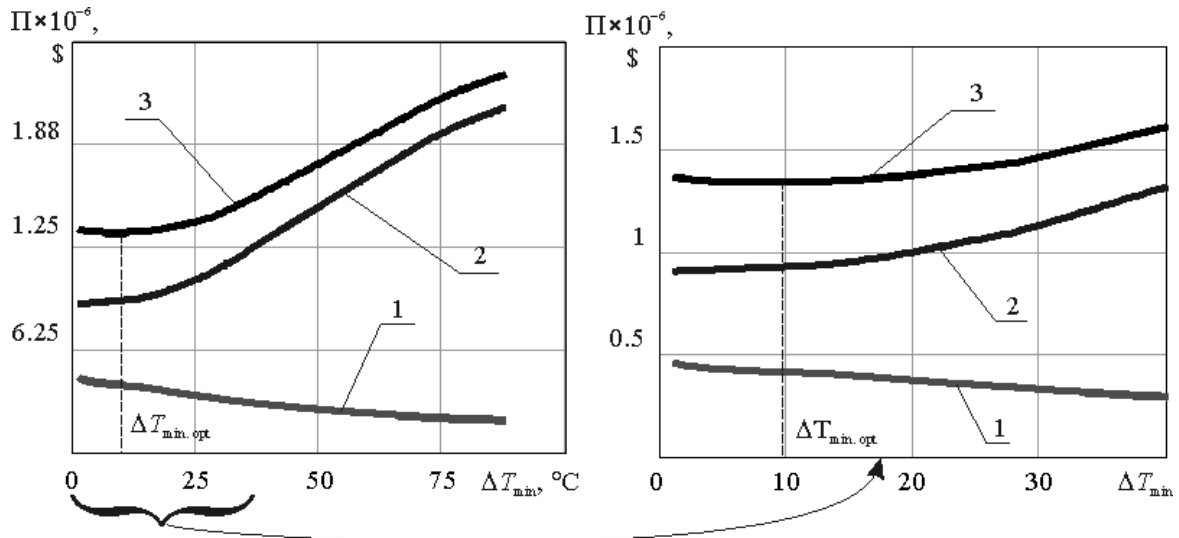


Рисунок 4 – Зависимость приведенной стоимости от  $\Delta T_{\min}$ : 1 – инвестиции в оборудование; 2 – энергии; 3 – общей;  $\Delta T_{\min, \text{opt}} \approx 10^\circ\text{C}$

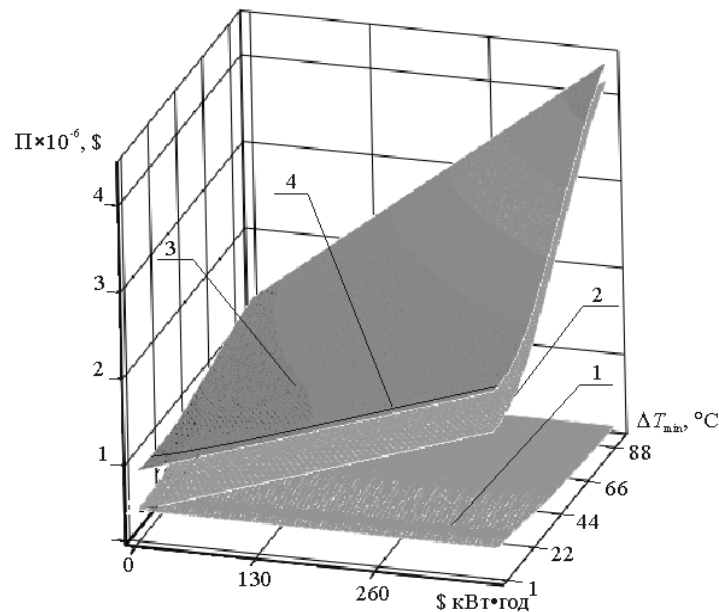


Рисунок 5 – Зависимость приведенной стоимости от  $\Delta T_{\min}$  и стоимости энергии: 1– теплообменного оборудования; 2 – энергии; 3 – общей; 4 – экстремальное значение приведенной стоимости.  $\Delta T_{\min, \text{opt}} \approx 10^\circ\text{C}$

В то же время зависимость проекта рекуперативной системы теплообмена от минимальной разности температур теплоносителей в теплообменных аппаратах –  $\Delta T_{\min}$  показывает очень пологое изменение в интервале  $\Delta T_{\min} \in 2 \dots 20^\circ\text{C}$  во всем диапазоне исследованных значений стоимости энергии, т.е. и для больших значений стоимости энергии (рис. 7).

Учитывая вышесказанное, мы с большой вероятностью можем говорить, что система рекуперации тепловой энергии в процессе производства гипофосфита натрия, спроектированная для  $\Delta T_{\min}$ , вы-

бранного из интервала 2...20°C, например для  $\Delta T_{\min} = 10^\circ\text{C}$ , будет работать в оптимальном режиме в пределах исследованных значений изменения стоимости энергоносителей.

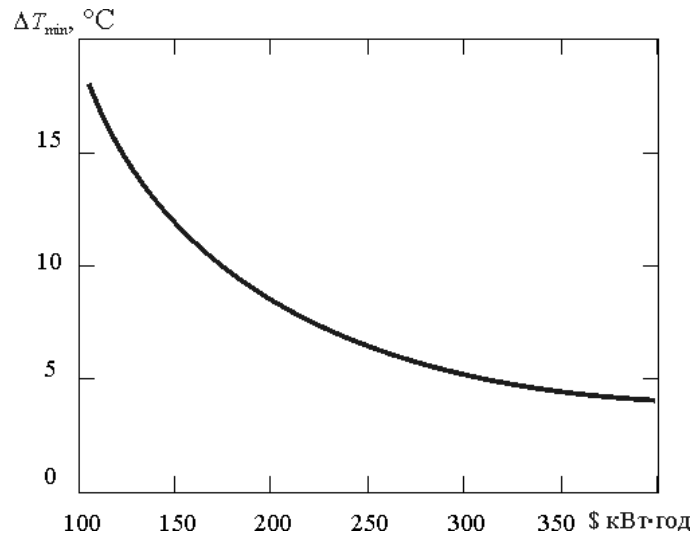


Рисунок 6 – Зависимость  $\Delta T_{\min, \text{opt}}$  от удельной стоимости энергии

Составные кривые, построенные для  $\Delta T_{\min} = 10^\circ\text{C}$  показывают величину мощности, которую необходимо будет подвести к процессу для его функционирования при наличии тепловой интеграции:  $Q_{H \min} = 4416,6 \text{ кВт}$  (рис. 8). Это значение на 5377,2 кВт меньше, чем мощность, необходимая для процесса без системы рекуперации. Таким образом интеграция процесса уменьшает потребление полезной мощности на 55%, то есть более, чем в 2 раза.

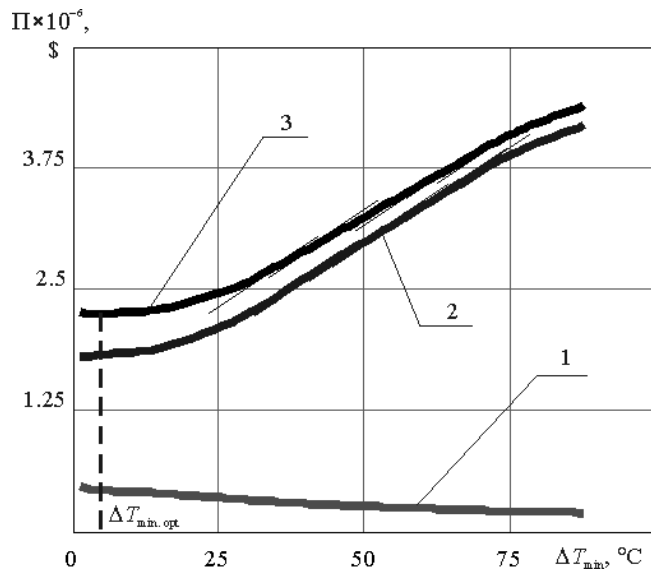


Рисунок 7 – Зависимость приведенной стоимости от  $\Delta T_{\min}$  для стоимости энергии, равной 400 долл. США в год за 1 кВт

Значение холодных утилит становится равным  $Q_{C \min} = 2237,9 \text{ кВт}$ , что на 70 % меньше, чем для процесса без тепловой интеграции.

Температуры пинча горячих потоков  $T_{Hpin} = 108^\circ\text{C}$  и холодных  $T_{Cpin} = 98^\circ\text{C}$ .

Предполагаемая поверхность площади теплообмена в системе рекуперации тепловой энергии равна  $S_1 \approx 3050 \text{ м}^2$ , а число теплообменных аппаратов  $\sim 16$ .

Если же построить составные кривые рассматриваемого процесса производства гипофосфита натрия для  $\Delta T_{\min} = 4^\circ\text{C}$ , то мы увидим, что потребление мощности горячих утилит сокращается до 1330,3 кВт, а холодных – до 2163,6 кВт (рис. 9), то есть горячие утилиты сокращаются на 74 кВт или на 1,7% от величины горячих утилит при  $\Delta T_{\min} = 10^\circ\text{C}$ .

В то же время прогнозируемая площадь поверхности теплообмена увеличится до  $3210\text{ м}^2$ , то есть на  $160\text{ м}^2$ , или на 5 %, что повлечет за собой дополнительные затраты ~ 160000\$ США. В то же время неизвестно как быстро будут дорожать энергоносители, поэтому было предложено создавать пинч-проект процесса при  $\Delta T_{\min} = 10^\circ\text{C}$ .

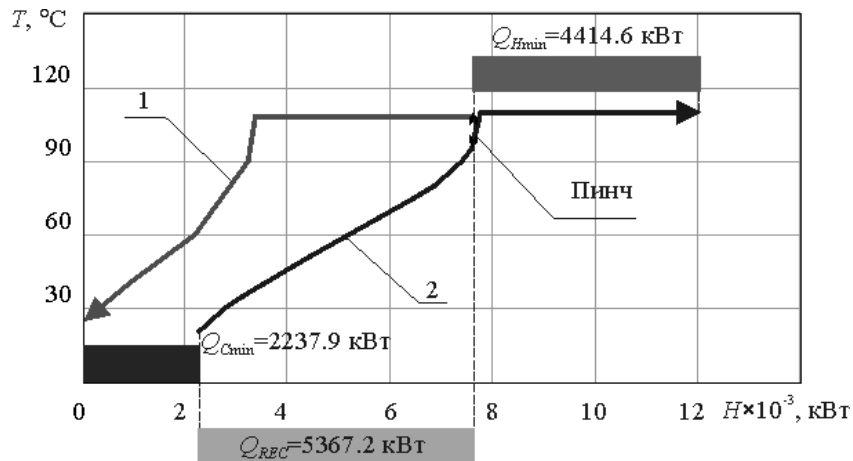


Рисунок 8 – Составные кривые для интегрированного процесса при  $\Delta T_{\min} = 10^\circ\text{C}$ :  
 1 – горячая составная кривая; 2 – холодная составная кривая;  $Q_{H\min}$  – горячие утилиты;  
 $Q_{C\min}$  – холодные утилиты;  $Q_{REC}$  – мощность рекуперации

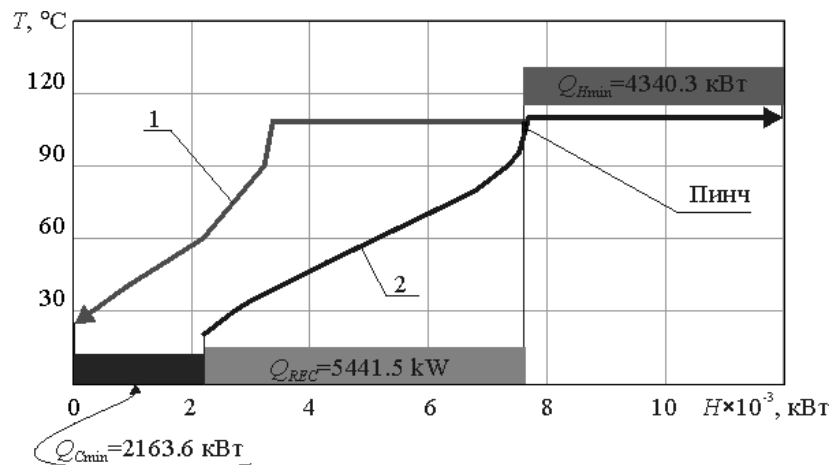


Рисунок 9 – Составные кривые для интегрированного процесса при  $\Delta T_{\min} = 4^\circ\text{C}$ :  
 1 – горячая составная кривая; 2 – холодная составная кривая;  $Q_{H\min}$  – горячие утилиты;  
 $Q_{C\min}$  – холодные утилиты;  $Q_{REC}$  – мощность рекуперации

Если отложить температуры пинча горячих и холодных потоков  $T_{H\text{pin}} = 108^\circ\text{C}$  и  $T_{C\text{pin}} = 98^\circ\text{C}$  на популяции технологических потоков (рис. 10), то мы увидим, что практически все технологические потоки располагаются ниже пинча и только два потока – №13 и №14 присутствуют выше пинча.

Температуры пинча для  $\Delta T_{\min} = 4^\circ\text{C}$  равны  $T_{H\text{pin}} = 108^\circ\text{C}$  и  $T_{C\text{pin}} = 104^\circ\text{C}$ . Располагая их на сеточной диаграмме, мы увидим, что структура популяции технологических потоков относительно локализации пинча будет инвариантной, то есть топология рекуперативной системы теплообмена при выбранном изменении  $\Delta T_{\min}$  будет неизменной. Это также говорит в пользу того, что на данном этапе стоит создавать пинч-проект для  $\Delta T_{\min} = 10^\circ\text{C}$ .

Целевые энергетические значения для пинч-проектирования мы уже выяснили при помощи построения составных кривых. Целевое значение для мощности горячих утилит равно  $Q_{H\min} = 4416,6$  кВт, холодных –  $Q_{C\min} = 2237,9$  кВт, мощность рекуперации теплоты –  $Q_{REC} = 5367,2$  кВт.

При пинч-проектировании нам необходимо выполнить только проект системы рекуперации ниже пинча, поскольку выше него у нас существуют только 2 холодных потока, нам необходимо сразу на них расположить горячие утилиты.

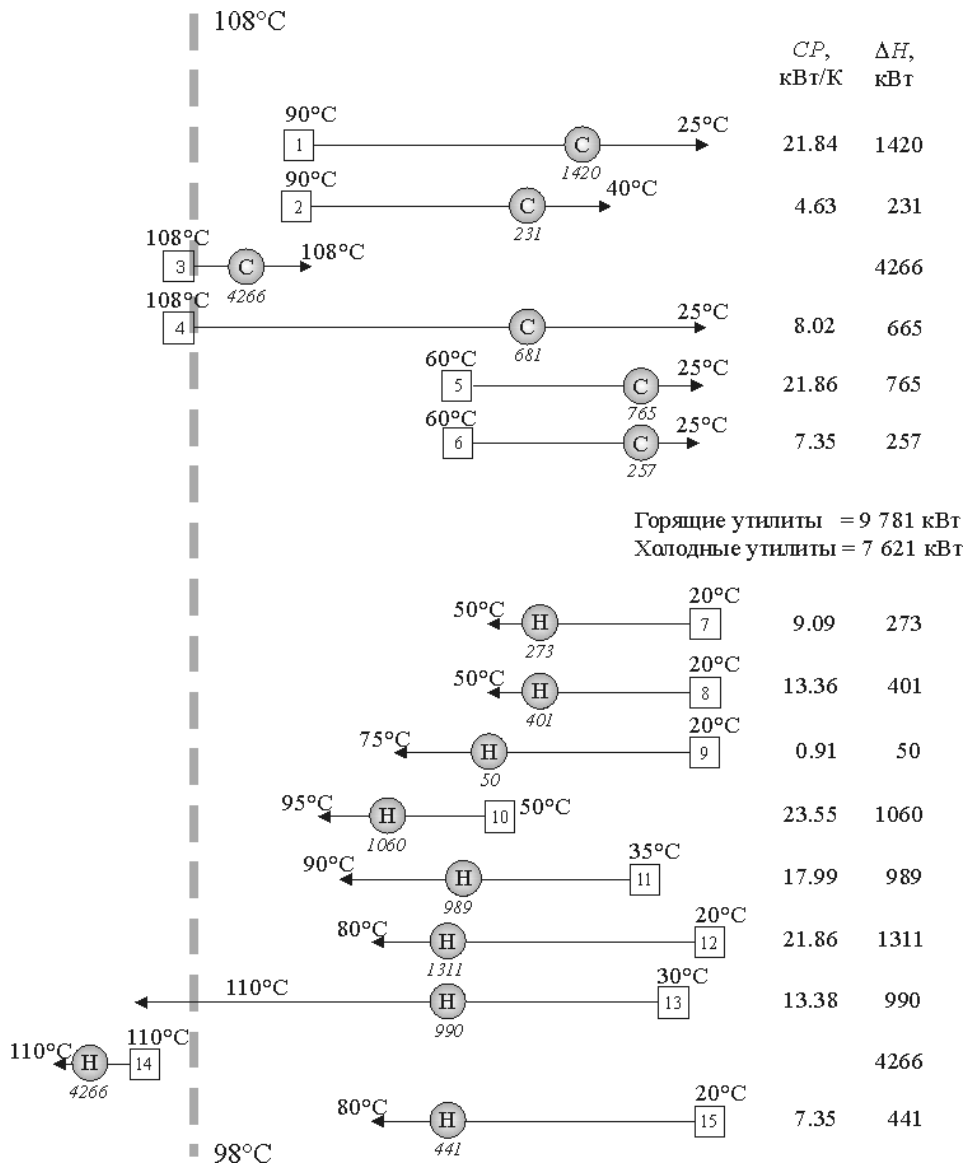


Рисунок 10 – Локализация пинча на сеточной диаграмме процесса:

C – холодные утилиты;

H – горячие утилиты; цифры под утилитными теплообменными аппаратами – их нагрузка в кВт

Затем, выполняя пинч-проектирование для системы ниже пинча, получаем сеточную диаграмму пинч-проекта системы теплообмена для процесса производства гипофосфита натрия (рис. 11).

В полученном проекте отсутствует перенос энергии через пинч и практически достигаются целевые энергетические значения, определенные ранее (рис. 11).



Используя полученную сеточную диаграмму пинч-проекта системы рекуперации тепловой мощности, построим принципиальную энерготехнологическую схему проекта производства гипофосфита натрия с системой рекуперации тепловой энергии.

Выполняя технологическую схему процесса, будем максимально использовать существующую в предлагаемом сейчас РХТУ проекте поверхность теплообмена. В качестве подогревателя воздуха, идущего в сушилки HE-3 и HE-5, предлагается оставить уже существующие теплообменные аппараты AH-1 и AH-2.

Поток №7 предполагается подогревать через рубашку реактора R1 потоком 1 после теплообменника HE-5, а поток №10 – разложение фосфорного шлама – подогревать одной из ветвей потока №3 в рубашке реактора R4.

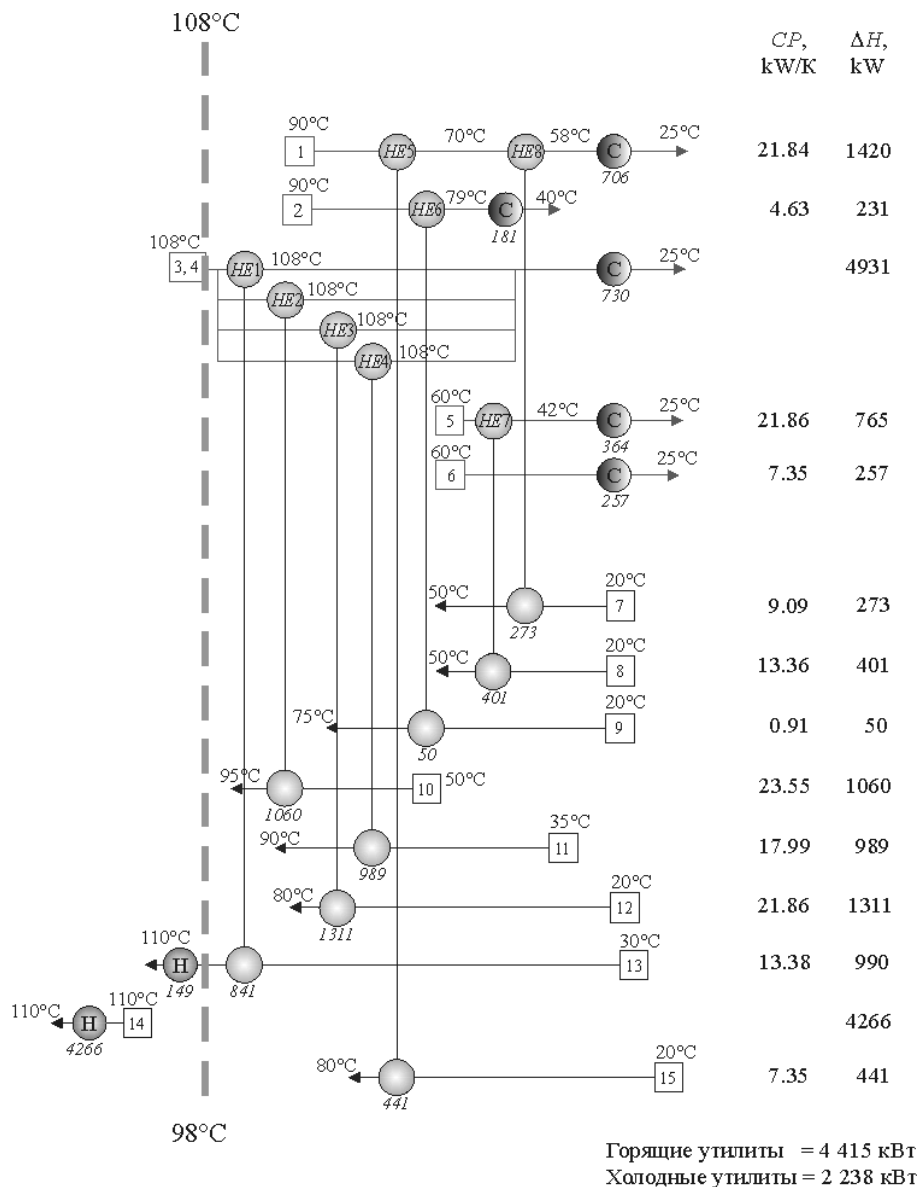


Рисунок 11 – Сеточная диаграмма интегрированного процесса производства гипофосфита натрия при  $\Delta T_{\min} = 10^\circ\text{C}$ : C – холодные утилиты; HE – рекуперативные теплообменные аппараты; H – горячие утилиты; цифры под теплообменными аппаратами – их нагрузка в кВт

После выполнения пинч-проектирования с указанными замечаниями, мы получаем принципиальную энерготехнологическую схему с четырьмя дополнительными теплообменниками (рис. 12).

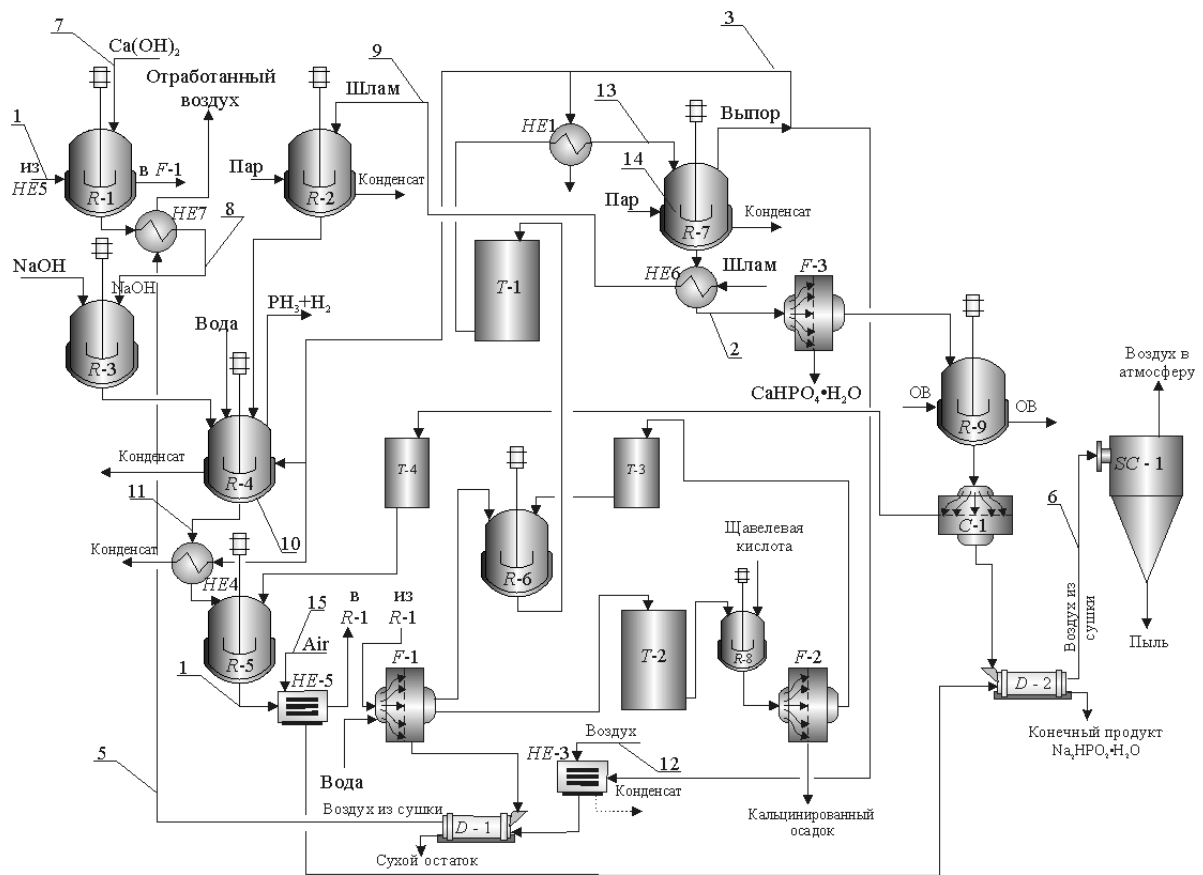


Рисунок 12 – Принципиальная технологическая схема производства гипофосфита натрия:  
 R1 – реактор подготовки  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ; R2 – реактор подготовки фосфорсодержащего шлама;  
 R3 – подготовка  $\text{NaOH}\text{-Ca}(\text{OH})_2$ ; R4 – основной реактор; R5 – последующий реактор;  
 R6 – нейтрализатор; R7 – выпарка; R8 – осаждение щавелевой кислотой; R9 – кристаллизатор;  
 F 1–3 – фильтр; T 1–4 – емкость; C1 – центрифуга; SC1 – циклон; D 1,2 – сушка;  
 AH 1,2 – подогреватель воздуха; HE – рекуперативные теплообменные аппараты.  
 Технологические потоки пронумерованы согласно таблице 1

При реализации проекта производства гипофосфита натрия с технологической схемой, изображенной на рисунке 1, ежегодная стоимость энергоносителей составит величину ~ 2 108 000 долл. США, а при внедрении технологической схемы, показанной на рисунке 12, годовая стоимость потребляемой энергии будет равна 987 000 долл. США. Срок окупаемости предлагаемой системы рекуперации тепловой энергии равен 14 месяцам.

**Заключение.** В результате обследования предлагаемого процесса производства гипофосфита натрия было определено энергопотребление процесса и распределение нагрузки между горячими и холодными утилитами. Выявлены недостатки существующей теплообменной системы, которые приводят к увеличению энергопотребления. Показано, что при внедрении системы рекуперации тепловой энергии прибыль составит 1,18 млн. \$ США в год, а срок окупаемости оценивается в 14 месяцев.

**Благодарности.** Работа выполнена при финансовой поддержке Европейского сообщества в рамках проекта ESCORNOS, контракт No INCO-CT-2005-013359.

#### Литература

1. Смит Р., Клемеш Й., Товажнянский Л.Л., Капустенко П.А., Ульев Л.М. Основы интеграции тепловых процессов. – Харьков: ХГПУ. 2000. – 457 с.

2. Вукович Л.К., Никульшин В.Р. Эксерго-топологическое моделирование сложных систем теплообменников // Пром. теплотехника. 1980. Т. 2, № 2. С. 53–59.
3. Клемеш Й., Костенко Ю.Т., Товажнянский Л.Л., Капустенко П.А., Ульев Л.М., Перевертайленко А.Ю., Зулин Б.Д. Применение метода пинч-анализа для проектирования энергосберегающих установок нефтепереработки // ТОХТ. 1999. Т. 33, №4. С. 420–431.
4. Товажнянский Л.Л., Капустенко П.А., Ульев Л.М., Болдырев С.А. Определение энергосберегающего потенциала в экстракционном процессе производства фосфорной кислоты // Интегровані технології та енергозбереження. 2007, № 3. С. 14–12.
5. Linnhoff B., Townsend D.W., et al. User guide on process integration for the efficient use of energy. IChemE, Rugby, UK 1991 (New addition 1994). – 247 p.

### Bibliography (transliterated)

1. Smit R., Klemesh J., Tovazhnjanskij L.L., Kapustenko P.A., Ul'ev L.M. Osnovy integracii telovyh processov. – Har'kov: HGPU. 2000. – 457 p.
2. Vukovich L.K., Nikul'shin V.R. Jeksergo-topologicheskoe modelirovanie slozhnyh sistem teplotobmennikov Prom. teplotehnika. 1980. Т. 2, # 2. p. 53–59.
3. Klemesh J., Kostenko Ju.T., Tovazhnjanskij L.L., Kapustenko P.A., Ul'ev L.M., Perevertaj-lenko A.Ju., Zulin B.D. Primenenie metoda pinch-analiza dlja proektirovanija jenergosberegajushhih ustanovok neftepererabotki TOHT. 1999. Т. 33, #4. p. 420–431.
4. Tovazhnjanskij L.L., Kapustenko P.A., Ul'ev L.M., Boldyrev S.A. Opredelenie jenergosberegajushhego potencijala v jekstrakcionnom processe proizvodstva fosfornoj kisloty Integrovani tehnologii ta energozbezhenija. 2007, # 3. p. 14–12.
5. Linnhoff B., Townsend D.W., et al. User guide on process integration for the efficient use of energy. IChemE, Rugby, UK 1991 (New addition 1994). – 247 p.

УДК 621:664(076)

Товажнянський Л.Л., Капустенко П.О., Ульєв Л.М., Болдирєв С.О., Нечипоренко Д.Д.

### ТЕПЛОЕНЕРГЕТИЧНА ІНТЕГРАЦІЯ ПРОЦЕСУ ВИРОБНИЦТВА ГИПОФОСФІТУ НАТРІЮ

У результаті обстеження запропонованого процесу виробництва гіпофосфіту натрію було визначено енергоспоживання процесу і розподіл навантаження між гарячими та холодними утилітами. Виявлено недоліки існуючої теплообмінної системи, які приводять до збільшення енергоспоживання. Показано, що при впровадженні системи рекуперації теплової енергії прибуток становитиме 1,18 млн. \$ США в рік, а строк окупності оцінюється в 14 місяців.

Tovazhnyanskyu L.L., Kapustenko P.A., Ulyev L.M., Boldyryev S.A., Nechiporenko D.D.

### HEAT INTEGRATION OF HYPOPHOSPHITE PRODUCTION PROCESS

The energy consumption in hypophosphite production process was defined after it observation it. The values of hot and cold utilities were defined too. In the paper was shown that that heat exchange system have a disadvantages which carry on to big value of energy consumption. With the help of pinch design methods was made the project of heat recuperation system. Use this project can give profit about 1,18 million US dollars in the year. Pay back period of this project is about fourteen months.

УДК 629.735.45.036

Иленко Е.Ю.

**ВЛИЯНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ФАКТОРОВ НА ПОКАЗАТЕЛИ НАДЕЖНОСТИ  
ВЕРТОЛЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ**

*Харьковский университет Воздушных Сил имени Ивана Кожедуба*

**Постановка та мета дослідження.** На основании обработки статистических данных об отказах и неисправностях совокупности турбореактивных, турбовинтовых и двухконтурных двигателей различного назначения в процессе эксплуатации были получены следующие зависимости показателей надёжности (наработки, приходящейся на одно выключение двигателя в полёте  $T_{\text{ОПВ}}$ , на один досрочный съём двигателя  $T_{\text{ДСД}}$  и на суммарное количество неисправностей  $T_{\Sigma}$ ) от основных эксплуатационных факторов [1, 2]:

$$T_{\text{ОПВ}} = a_{\text{ОПВ}} \cdot \rho^{-0,572} \cdot h^{0,797} \cdot \tau_{\Sigma}^{0,422} \text{ тыс. час/отк.}; \quad (1)$$

$$T_{\text{ДСД}} = a_{\text{ДСД}} \cdot \rho^{-0,161} \cdot h^{0,967} \cdot \tau_{\Sigma}^{0,284} \text{ тыс. час/отк.}; \quad (2)$$

$$T_{\Sigma} = a_{\Sigma} \cdot \rho^{-0,379} \cdot h^{0,098} \cdot \tau_{\Sigma}^{0,246} \text{ тыс. час/отк.}, \quad (3)$$

где  $\rho$  – средняя относительная величина использования максимальных режимов за ресурс;  $h$  – средняя величина продолжительности полёта;  $\tau_{\Sigma}$  – величина суммарной наработки (с начала эксплуатации) парка двигателей данного типа (млн. час);  $a_{\text{ОПВ}}$ ,  $a_{\text{ДСД}}$ ,  $a_{\Sigma}$  – соответствующие постоянные коэффициенты.

Влияние на надёжность авиационных двигателей (АД) суммарной наработки парка двигателей данного типа  $\tau_{\Sigma}$  эквивалентно совокупности влияния на АД уровня ресурса, интенсивности эксплуатации, уровня совершенства технической и летной эксплуатации, уровня конструктивного и производственно-технологического совершенства двигателя. С увеличением суммарной наработки парка двигателей в силу действия эффекта обратной связи средняя наработка, приходящаяся на один отказ АД, увеличивается [1].

Определение величин  $a_{\text{ОПВ}}$ ,  $a_{\text{ДСД}}$ ,  $a_{\Sigma}$  для конкретного двигателя осуществляется на основании материалов обобщения и анализа информации об их отказах и неисправностях, имеющих место в процессе эксплуатации.

В работах [3, 4] обобщены и проанализированы данные об отказах и неисправностях двигателей ГТД-350, устанавливаемых на вертолетах Ми-2, которые эксплуатировались для обучения курсантов-летчиков в лётных частях Харьковского университета Воздушных сил имени Ивана Кожедуба в период с 1995 по 2005 год. В течение 11 лет зафиксировано 35 случаев отказа АД ГТД-350, которые привели к досрочному снятию двигателей в ремонт при наработке двигателей за рассматриваемое время более 36 тыс. час.

На основании выражений (1–3) представляется возможным оценить влияние эксплуатационных факторов  $\rho$  и  $h$  при известном значении  $\tau_{\Sigma} = 2$  млн. час, на показатели надёжности АД ГТД-350.

Для получения расчетных формул, по которым можно определить влияние входящих в них факторов на показатели надёжности, необходимо знать величины постоянных коэффициентов  $a_{\text{ОПВ}}$ ,  $a_{\text{ДСД}}$ ,  $a_{\Sigma}$ . Для их определения используем значения эксплуатационных факторов и полученные при этом значения показателей надёжности.

При значениях среднего процента использования взлетного режима  $\rho = 8\%$ , средней продолжительности полета  $h = 0,3$  час и общей наработке двигателей данного типа с начала эксплуатации  $\tau = 2$  млн. час получены следующие значения показателей надёжности АД ГТД-350 [3]:  $T_{\text{ДСД}} =$

= 898,6 час/отк.,  $T_{Oy\text{Э}}=2620,8$  час/отк.,  $T_{\Sigma}=669,1$  час/отк. Где  $T_{Oy\text{Э}}$  – отказ, обнаруженный и устраненный в эксплуатации. Показатель надежности  $T_{OПВ}$  – наработка на один отказ, приведший к выключению двигателя в полете, не рассматривается, по причине отсутствия таких случаев за время эксплуатации.

Подставив в зависимости (2, 3) значения эксплуатационных факторов и показателей надежности, получаем значения коэффициентов:  $a_{DCD}=3,3044$ ;  $a_{\Sigma}=1,4588$ . Тогда зависимости, определяющие влияние эксплуатационных факторов на показатели надежности двигателя, принимают вид:

$$T_{DCD} = 3,3044 \cdot \rho^{-0,161} \cdot h^{0,967} \cdot \tau_{\Sigma}^{0,284} \text{ тыс. час/отк.}; \quad (4)$$

$$T_{\Sigma} = 1,4588 \cdot \rho^{-0,379} \cdot h^{0,098} \cdot \tau_{\Sigma}^{0,246} \text{ тыс. час/отк.} \quad (5)$$

Выражение для показателя надежности  $T_{Oy\text{Э}}$  получаем из  $T_{Oy\text{Э}} = \frac{T_{DCD} \cdot T_{\Sigma}}{T_{DCD} - T_{\Sigma}}$ :

$$T_{Oy\text{Э}} = \frac{4,8205\rho^{-0,540}h^{1,065}\tau_{\Sigma}^{0,530}}{3,3044\rho^{-0,161}h^{0,967}\tau_{\Sigma}^{0,284} - 1,4588\rho^{-0,379}h^{0,098}\tau_{\Sigma}^{0,246}} \quad (6)$$

Общие закономерности (4–5) позволяют получить расчетные формулы, определяющие влияние на показатели надежности двигателя ГТД-350 каждого отдельного эксплуатационного фактора при фиксированных значениях других.

Влияние процента использования взлетного режима  $\rho$  при средней продолжительности полета  $h=0,3$  час и общей наработке двигателей с начала эксплуатации  $\tau_{\Sigma}=2$  млн. час на величину  $T_{DCD}$  (рисунок 1):

$$T_{DCD} = 1,2559 \cdot \rho^{-0,161} \quad (7)$$

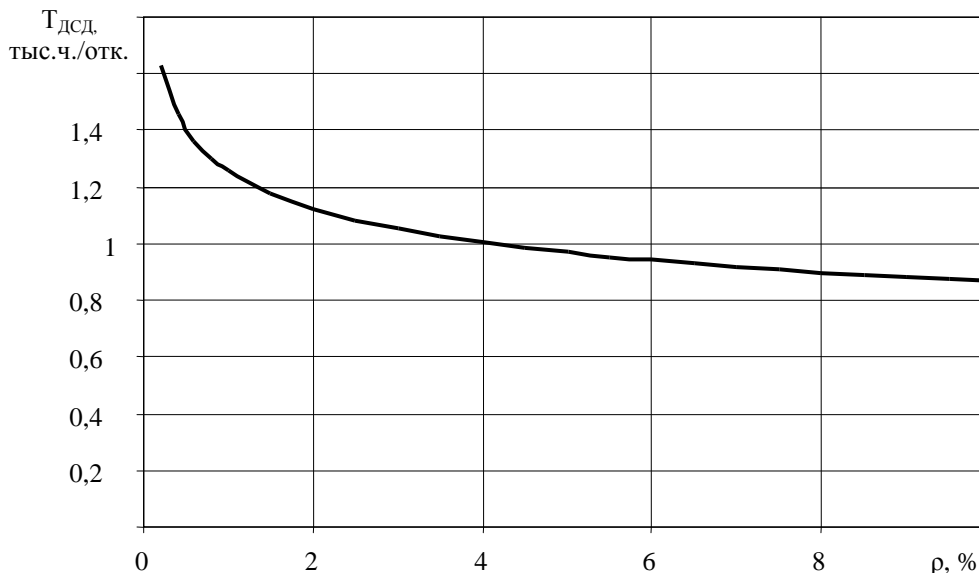


Рисунок 1 – Зависимость  $T_{DCD}$  от среднего процента использования взлетного режима  $\rho$  при  $h=0,3$  час и  $\tau=2$  млн. час

Влияние средней продолжительности полета  $h$  при среднем проценте использования взлетного режима  $\rho=8\%$  и общей наработке двигателей с начала эксплуатации  $\tau=2$  млн. час на величину  $T_{ДСД}$  (рисунок 2):

$$T_{ДСД} = 2,8787 \cdot h^{0,967} . \quad (8)$$

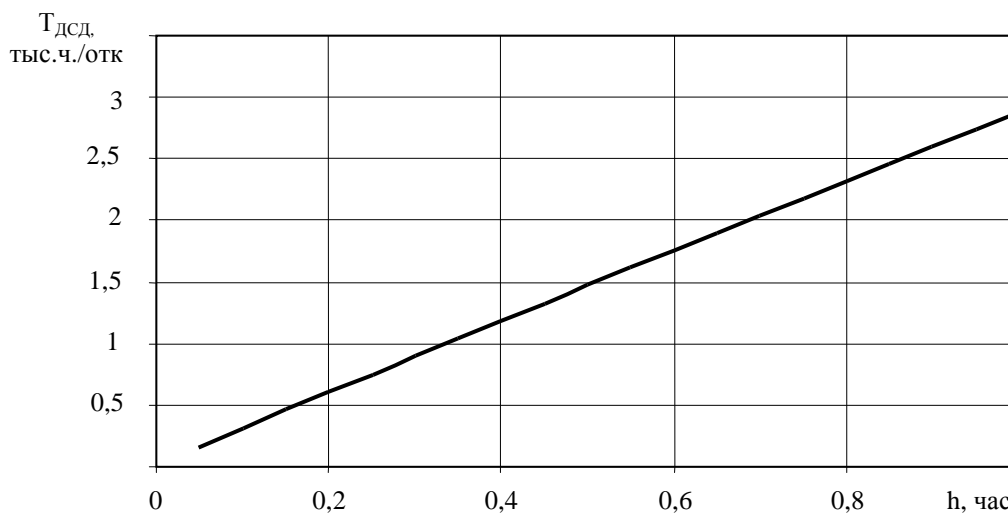


Рисунок 2 – Зависимость  $T_{ДСД}$  от средней продолжительности полета  $h$  при  $\rho=8\%$  и  $\tau=2$  млн. час

Влияние процента использования взлетного режима  $\rho$  при средней продолжительности полета  $h=0,3$  час и общей наработке двигателей с начала эксплуатации  $\tau=2$  млн. час на величину  $T_{\Sigma}$  (рисунок 3):

$$T_{\Sigma} = 1,5375 \cdot \rho^{-0,379} . \quad (9)$$

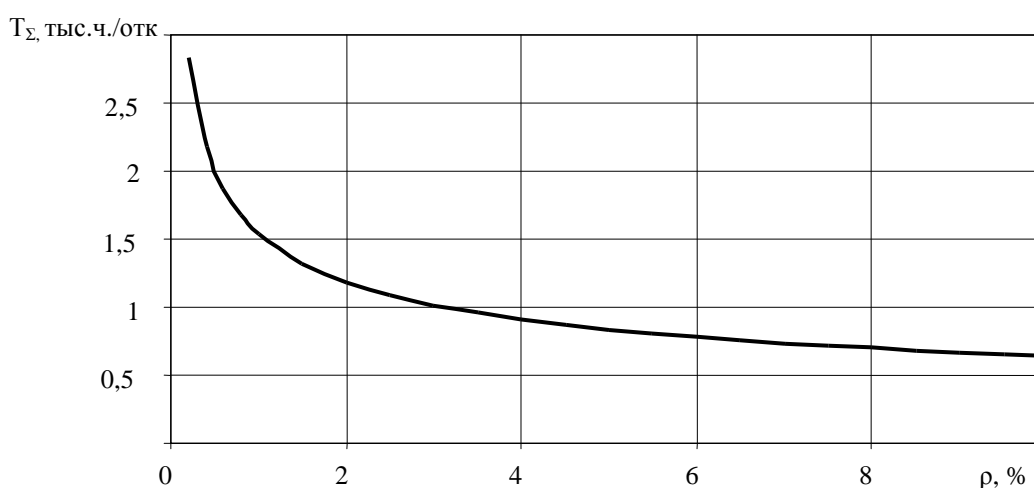


Рисунок 3 – Зависимость  $T_{\Sigma}$  от среднего процента использования взлетного режима  $\rho$  при  $h=0,3$  час и  $\tau=2$  млн. час

Влияние средней продолжительности полета  $h$  при среднем проценте использования взлетного режима  $\rho=8\%$  и общей наработке двигателей с начала эксплуатации  $\tau=2$  млн. час на величину  $T_{\Sigma}$  (рисунок 4):

$$T_{\Sigma} = 0,7866 \cdot h^{0,098} . \quad (10)$$

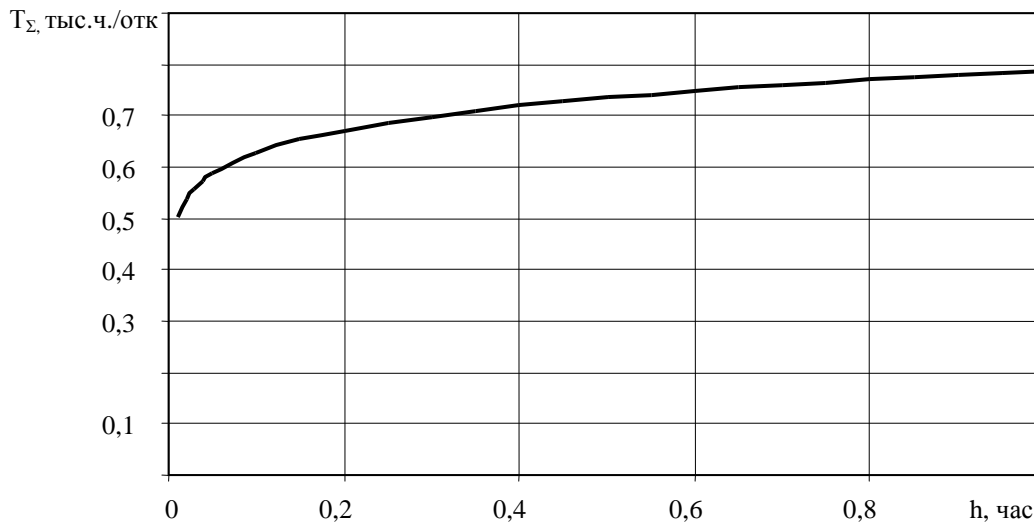


Рисунок 4 – Зависимость  $T_{\Sigma}$  от средней продолжительности полета  $h$  при  $\rho=8\%$  и  $\tau=2$  млн. час

**Выводы.** Таким образом, увеличение средней продолжительности полета  $h$  приводит к практически пропорциональному увеличению наработки  $T_{ДСД}$  на всем диапазоне возможных значений  $h$  (рисунок 2). Наиболее значительное уменьшение  $T_{ДСД}$  наблюдается при малых значениях средней продолжительности полета. Величина  $T_{ДСД}$  при  $h=10$  мин. примерно в 5 раз меньше, чем при средней продолжительности полета  $h=1$  час.

Наработка на суммарное количество неисправностей  $T_{\Sigma}$  минимальна при значениях средней продолжительности полета  $h$  до 6 мин. (рисунок 4). Далее с ростом  $h$  степень влияния фактора на показатель надежности  $T_{\Sigma}$  уменьшается.

Увеличение средней величины использования максимальных режимов за ресурс  $\rho$  приводит к уменьшению наработок  $T_{ДСД}$  (рисунок 1) и  $T_{\Sigma}$  (рисунок 3). Наименьшие значения  $T_{ДСД}$  и  $T_{\Sigma}$  принимают при значениях  $\rho$ , превышающих 10%. В диапазоне величин  $\rho$  от минимальных значений до 5% наблюдается наиболее интенсивная динамика роста влияния эксплуатационного фактора на величины наработок  $T_{ДСД}$  и  $T_{\Sigma}$ .

Полученные аналитические зависимости (7–10) позволяют прогнозировать надежность вертолетных двигателей ГТД-350 в процессе применения их по назначению с учетом эксплуатационных факторов.

#### Литература

1. Алексеев К.П. Надёжность и технико-экономические характеристики авиационных двигателей. – М.: Транспорт, 1980. – 102 с.
2. Анипко О.Б., Иленко Е.Ю. Управление надежностью объектов авиационной техники как сложных технических систем. / Интегровані технології та енергозбереження. Збірник наукових праць НТУ «ХПІ». Харків: НТУ «ХПІ». – 2005. – №2 – С. 145–149.

3. Анипко О.Б., Иленко Е.Ю. Прогнозирование  $\gamma$ -процентного ресурса вертолетного двигателя на основании данных эксплуатации / Интегровані технології та енергозбереження. Збірник наукових праць НТУ «ХПІ». Харків: НТУ «ХПІ». – 2007. – №2 – С. 89–96.

4. Анипко О.Б., Иленко Е.Ю. Прогнозирование остаточного ресурса объектов вооружения и военной техники в нерасчетных условиях эксплуатации / Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов. Сб. науч. трудов Нац. аэрокосмич. ун-та им. Н.Е. Жуковского “ХАИ”. Харьков: НАКУ “ХАИ”. – 2008. – №1(52) – С. 15–20.

Bibliography (transliterated)

1. Alekseev K.P. Nadjozhnost' i tehniko-jekonomicheskie harakteristiki aviacionnyh dvigatelej. – M.: Transport, 1980. – 102 p.

2. Anipko O.B., Ilenko E.Ju. Upravlenie nadezhnost'ju ob'ektov aviacionnoj tehniky kak slozhnyh tehniceskix sistem. Integrovani tehnologii ta energozberezhenija. Zbirnik naukovih prac' NTU «HPI». Harkiv: NTU «HPI». – 2005. – #2 – p. 145–149.

3. Anipko O.B., Ilenko E.Ju. Prognozirovanie  $\gamma$ -procentnogo resursa vertoletnogo dvigatelja na osnovanii dannyh jekspluatacii Integrovani tehnologii ta energozberezhenija. Zbirnik naukovih prac' NTU «HPI». Harkiv: NTU «HPI». – 2007. – #2 – p. 89–96.

4. Anipko O.B., Ilenko E.Ju. Prognozirovanie ostatochnogo resursa ob'ektov vooruzhenija i voennoj tehniky v neraschetnyh uslovijah jekspluatacii Voprosy proektirovanija i proizvodstva konst-rucij letatel'nyh apparatov. Sb. nauch. trudov Nac. ajerokosmich. un-ta im. N.E. Zhukovskogo “HAI”. Har'kov: NAKU “HAI”. – 2008. – #1(52) – p. 15–20.

УДК 629.735.45.036

Иленко Е.Ю.

**ВПЛИВ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ФАКТОРІВ НА ПОКАЗНИКИ НАДІЙНОСТІ  
ВЕРТОЛІТНИХ ДВИГУНІВ**

Виявлені залежності впливу експлуатаційних факторів на показники надійності вертолітних двигунів ГТД-350. Результати отримані на основі загальних закономірностей впливу експлуатаційних факторів на показники надійності авіаційних двигунів та даними про відмови вертолітних двигунів ГТД-350, що експлуатувались протягом 11 років в умовах навчальних льотних частин.

Ilenko Ye.Yu.

**IMPACT OF OPERATIONAL FACTORS ON RELIABILITY INDICES OF HELICOPTER ENGINES**

The impact of operational factors on reliability indices of GTD-350 helicopter engines has been established. The results have been obtained based on the general pattern of the effect of operational factors on reliability indices of aircraft engines as well as failure data for GTD-350 engines that have been operated in training flying units for 11 years.



**КОМПЛЕКСНЫЙ ПОДХОД ПО ФОРМИРОВАНИЮ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБЛИКА СИЛОВОЙ УСТАНОВКИ, ИНТЕГРИРУЕМОЙ В ПЛАНЕР, ПРИ СИНТЕЗЕ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА***Харьковский университет Воздушных Сил имени Ивана Кожедуба*

Современные требования к летательным аппаратам (ЛА) военно-транспортной авиации являются противоречивыми, а порой и взаимоисключающими. Существующий парк военно-транспортных самолетов Украины не всегда соответствует современным требованиям, а силовые установки (СУ) имеют параметры шумности и выбросы вредных веществ в окружающую среду, которые превышают международные требования. Все это в совокупности приводит к недостаточной эффективности военно-транспортной авиации в целом, а ЛА становятся не конкурентоспособными на современном авиационном рынке.

Эффективность применения той или иной СУ на ЛА в основном решается путем проведения летных испытаний. Однако, ввиду того, что современный ЛА представляет собой сложную техническую систему (СТС) метод проб не обеспечивает достижения заданных показателей летно-технических характеристик (ЛТХ) ввиду возникновения новых интегративных свойств у ЛА. Задача синтеза усугубляется еще и тем, что как планер, так и СУ сами представляют собой сложные технические системы.

Непосредственно решением вопросов интеграции СУ и планера ЛА занимаются в России, США, Франции, Великобритании, Китае. До настоящего времени такие задачи решаются на уровне согласования отдельных показателей СУ и планера, исходя из требований к создаваемому ЛА [1–6]. Одним из основателей системного подхода к проблеме согласования характеристик СУ и планера является И.Ф. Флоров [1], который начал рассматривать основные параметры и характеристики двигателя вместе с характеристиками самолета. Развитием проблемы согласования характеристик занимались Ахмедзянов А.М., Румянцев С.В., Романов В.В., Сгилевский В.А., Тунаков А.П., Югов О.К., Селиванов О.Д., Маслов В.Г. и другие. Однако с ростом сложности технических систем как ЛА в целом, так и их СУ, такой подход уже не обеспечивает технических решений на полномасштабных объектах, что приводит к многочисленным доработкам в ходе испытаний и эксплуатации ЛА. Так, до сих пор окончательно не решена задача по интеграции СУ и элементов планера на самолетах Ан–140, Ан–148, Ан–70Т. Поэтому разработка комплексного подхода и методического аппарата для формирования технического облика СУ интегрируемой с планером при синтезе ЛА как сложной технической системы представляется актуальной научной проблемой.

**Актуальность и постановка задачи.** Анализ результатов исследования показал, что современный ЛА представляет собой СТС, которую можно разделить на две основных подсистемы по сложности физических процессов, происходящих в полете: СУ и планер. Существующие подходы по согласованию характеристик СУ и планера ЛА не учитывают взаимного влияния их параметров на уровне рабочих процессов. Сложная система, состоящая из двух сложных подсистем, обладает новыми интегративными свойствами (рис. 1), которые зачастую не могут быть выявлены при проектировании и согласовании характеристик ЛА. Кроме того, нет единого подхода, по которому можно определить целесообразность применения той или иной СУ при интеграции ее с планером ЛА. Процесс формирования облика силовой установки интегрируемой с планером при синтезе современного ЛА необходимо проводить в совокупности двух основных подсистем – планера и силовой установки. Из рассмотренных составляющих интеграции ЛА и СУ большой интерес представляет параметрическая интеграция [7], поскольку она оказывает наибольшее влияние на ЛТХ ЛА как СТС на этапе предварительных проработок.

Современный инструментарий и методы не содержат всех средств, необходимых для интеграции СУ и планера в процессе синтеза ЛА как СТС на ранних этапах проектирования ЛА с данной СУ. В связи с этим, предлагается комплексный подход для формирования технического облика силовой установки интегрируемой в планер при синтезе ЛА транспортного назначения как сложной технической системы для обеспечения достижения заданных ЛТХ и ТТХ на ранних стадиях проектирования (рис. 2).

До настоящего времени подход к формированию облика ОАТ ограничивался уровнем более или менее глубокого и согласованного обоснования ТТЗ, при этом варианты конструктивно-компоновочных и проектно-технических решений обрабатывались уже при проектировании и на последующих стадиях, вплоть до испытаний. Таким образом, возникла задача прогнозирования и моделирования структурно-сложных организационно-технических систем с развитой иерархией. Однако эта задача не может быть решена на основе какого-либо одного подхода или метода [8–12].

Поэтому, учитывая сложность взаимосвязей в современных ОАТ, большое количество факторов, оказывающих влияние на свойства объекта, необходимость большого объема разнородной информации для анализа, сравнения и принятия решения, признано целесообразным применить синтез методов эвристического и математического моделирования функционирования, с использованием экспериментальных данных и ретроспективного анализа.

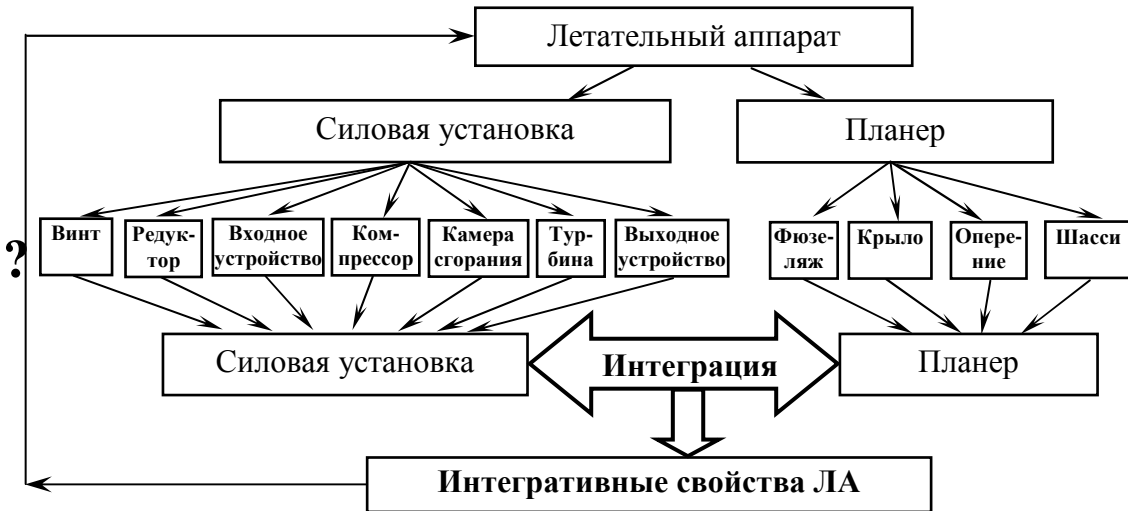


Рисунок 1 – Влияние интегративных свойств на ЛТХ ЛА

В основе такой системы лежит концептуальный подход, заключающийся в применении метода сравнения для выбора вариантов, исключающий использование так называемых базовых образцов, в то же время позволяющего оценить вклады отдельных элементов и подсистем на различных иерархических уровнях сложной технической системы [8]. Таким образом, обеспечивается независимость единой методологической базы от субъективных факторов разработчиков тактико-технических требований (ТТТ) к конструктивно-компоновочным вариантам ОАТ. Комплексный подход включает синтез подсистем ЛА на основе параметрической интеграции СУ и планера ЛА на ранних этапах проектирования (рис. 2), который построен по непрерывному модульному принципу.

В связи с этим ключевую роль приобретают прогнозные исследования при обосновании облика перспективных или модернизируемых объектов, причем такие исследования должны проводиться на всех этапах их жизненного цикла [5, 8, 9]. Возникает такое научно-техническое направление, как исследовательское проектирование, которое в тоже время является обязательным самостоятельным этапом в многоуровневом процессе разработки, комплексных испытаний, эксплуатации и применения ОАТ. Существующие особенности концептуального проектирования подчеркивают, с одной стороны, весомость и значимость технических решений, а с другой - существенную зависимость адекватности прогнозов от большого числа действительных факторов, причем часто не военно-технического характера, что в принципе не может быть выявлено на стадии прогнозов. Система исследовательского проектирования должна включать функциональный, технический и экономический модули, которые могут быть отдельными подсистемами.

Таким образом, выполнение этапов концептуального проектирования ЛА предполагает собой непрерывный мониторинг процесса создания ОАТ (рис. 3). Такой мониторинг должен включать этапы контроля и сбора информации, ее обработки и анализа, а также построение прогнозов. Основные этапы параметрической интеграции СУ и планера ЛА заключаются в следующем:

1. Анализируются ТТТ к ЛА, который разрабатывается или модернизируется. Проводится начальное обоснование выбора планера и типа силовой установки исходя из оперативно-тактических или стратегических задач ЛА. Учитывается опыт применения СУ на ЛА предыдущих разработок.

2. На основе существующих баз данных по планеру и СУ или проведенных НИОКР исследуются варианты проработки двух отдельных подсистем. Для сравнения и анализа результатов исследований используется метод оценки уровня технического совершенства ОАТ по степени рациональности параметров, показателей и ЛТХ. Данный метод предполагает использование рациональных значений параметров, показателей и ЛТХ, которые могут формироваться с помощью эвристических методов, методов аналогий и математического моделирования.

3. Проводится сравнение конструктивно компоновочных решений вариантных проработок подсистем на уровне параметрического согласования характеристик планера и силовой установки.
4. Оцениваются вклады в общий показатель степени технического совершенства, анализируются преимущества и недостатки подсистем.
5. Обосновывается и выбирается конструктивно-компоновочное решение варианта с использованием показателя и критериев степени интеграции СУ и планера ЛА.

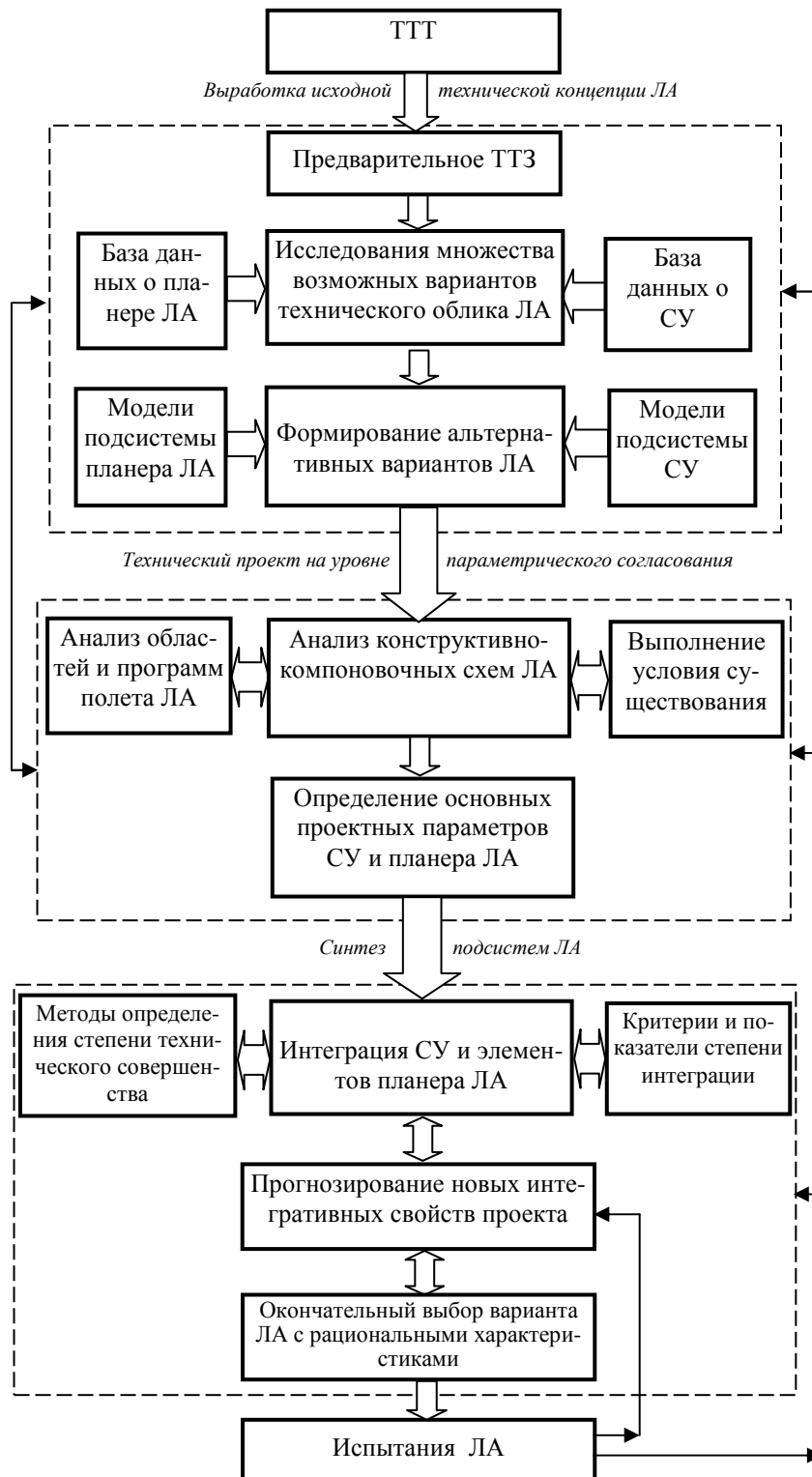


Рисунок 2 – Этапы концептуального проектирования ЛА



Таким образом, разработанный комплексный подход предполагает проведение исследований по двум техническим подсистемам – планеру и СУ. В настоящее время разработка и реализация этих подсистем проводятся в разных организациях, соответствующих данным направлениям работ. Поэтому, учитывая то, что для проведения практических исследований используется одинаковый подход по определению степени технического совершенства подсистем и оценки вкладов в общий показатель, то в дальнейших исследованиях эти этапы показаны только для подсистемы “силовая установка”. Для подсистемы “планер” предполагается, что формирование технического облика (а также его рациональных параметров) проведено, конструктивно-компоновочное решение планера определено.

Однако существующие показатели и критерии не полно учитывают степень технического совершенства конструктивно-компоновочных решений ЛА на основе тяговых, аэродинамических и геометрических характеристик [13]. В связи с этим, на основе результатов сравнения различных конструктивно-компоновочных решений ЛА и их двигателей разработан показатель интеграции, сущность которого заключается в определении интегративного свойства ЛА с учетом тяговых, аэродинамических и геометрических характеристик [13].

Разработанный показатель можно использовать как для прямого определения характеристик ЛА, так и наоборот, задавшись его значением, можно определять параметры ЛА как единой технической системы. Таким образом, определяя значение показателя интеграции для группы ЛА, получены обобщенные уравнения зависимостей показателя интеграции от параметров СУ и элементов планера ЛА (табл. 1).

Таблица 1 – Обобщенные уравнения зависимости показателя интеграции от параметров и характеристик ЛА и СУ

Схема компоновки ЛА и СУ	Обобщенные зависимости показателя интеграции от параметров и характеристик планера и СУ
ЛА с 4 ТРД под крылом	$P_{\text{инт}} = 0,0115 \cdot P_{\text{взл}}^2 - 0,035 \cdot P_{\text{взл}} + 0,4281$ $P_{\text{инт}} = 0,0093 \cdot \gamma_{\text{дв}}^2 - 0,1149 \cdot \gamma_{\text{дв}} + 0,7421$ $P_{\text{инт}} = 0,0126 \cdot S_{\text{уд}}^2 - 0,0432 \cdot S_{\text{уд}} + 0,4403$ $P_{\text{инт}} = -0,0006 \cdot K_{\text{ла}}^2 + 0,0587 \cdot K_{\text{ла}} + 0,3187$
ЛА с 2 ТРДД под крылом	$P_{\text{инт}} = 0,0256 \cdot C_{\text{удкр}}^2 - 0,412 \cdot C_{\text{удкр}} + 6,8385$ $P_{\text{инт}} = -0,1241 \cdot S_{\text{уд}} + 6,24$ $P_{\text{инт}} = 0,039 \cdot K_{\text{ла}}^2 - 0,4797 \cdot K_{\text{ла}} + 6,4755$
ЛА с 2 ТРДД под крылом + 1 ТРД в хвостовой части	$P_{\text{инт}} = -0,0054 \cdot D_{\text{дв}}^2 - 0,1329 \cdot D_{\text{дв}} + 3,0175$ $P_{\text{инт}} = 0,0204 \cdot S_{\text{мид}}^2 - 0,3551 \cdot S_{\text{мид}} + 3,2745$ $P_{\text{инт}} = -0,0054 \cdot S_{\text{уд}}^2 - 0,1329 \cdot S_{\text{уд}} + 3,0175$ $P_{\text{инт}} = -0,0108 \cdot K_{\text{ла}} + 2,5916$
ЛА с 4 ТРДД под крылом	$P_{\text{инт}} = -0,0856 \cdot C_{\text{удкр}} + 2,0176$ $P_{\text{инт}} = 0,0025 \cdot K_{\text{ла}}^2 - 0,0911 \cdot K_{\text{ла}} + 2,0085$ $P_{\text{инт}} = -0,0033 \cdot P_{\text{кр}}^2 + 0,1619 \cdot P_{\text{кр}} + 0,6214$

Однако обобщенные уравнения зависимости показателя интеграции от параметров и характеристик планера и СУ представляют собой поверхности в многомерном пространстве [10]. Учитывая тот факт, что в этом пространстве для каждого параметра и характеристики есть свое наилучшее значение, то можно представить некоторую рациональную поверхность, которая описывает рациональный диапазон параметров и характеристик ЛА. В данных исследованиях показаны обобщенные уравнения тех зависимостей, которые представляют интерес для дальнейших проработок. Каждый параметр имеет свой рациональный диапазон, а значит и поверхность в пространстве имеет выраженные границы.

Объект авиационной техники (ОАТ) представляется рациональным, если его подсистемы позволяют достигать заданных ЛТХ и тактико-технических требований, определенных типовыми тактическими задачами (целями) или его назначением, при наименьших затратах технических ресурсов и стоимости. Таким образом, очевидно, что для сопоставления различных ОАТ необходимо сопоставить их показатели подсистем или характеристики с рациональными их значениями. В основу оценки

уровня технического совершенства ОАТ положены безразмерные отношения, которые в общем случае лишь косвенно зависят от режимов эксплуатации характеристик технической системы.

Для оценки возможности и степени технического совершенства объектов авиационной техники используется метод сравнения по степени рациональности, изложенный в работах [8, 14–16]. В целом, совершенство технической системы оценивается как совокупность количественных и качественных показателей [16]. Кроме сравнения по полным показателям технического совершенства и рыночной привлекательности ОАТ в целом, подход позволяет оценить вклады отдельных компонентов сложной технической системы и ее характеристик для выработки решений о направлении работ по повышению технического совершенства или рыночной привлекательности. Вклады наглядно могут быть проиллюстрированы номограммами [17].

Выполненная таким образом сравнительная оценка позволяет оценить парк ОАТ как по классу, поколению, так и по отдельным составляющим. На основе такого анализа должны разрабатываться программы НИОКР и ежегодные государственные оборонные заказы, цель которых – достижение требуемого уровня потенциала Воздушных Сил Украины. Кроме того, данный метод позволяет сформировать группы параметров и характеристик для каждого рассматриваемого ОАТ, по которым необходимо проводить перспективные НИОКР направленные на улучшение их значений.

Однако при практическом применении разработанного метода одной из главных задач является определение рациональных значений параметров, характеристик и показателей, поскольку для каждого параметра, характеристики или показателя существует свой рациональный диапазон. Определение числовых значений рациональных показателей сложной технической системы является ключевым этапом при реализации метода оценки уровня технического совершенства сложной технической системы по степени рациональности.

При создании рациональных систем представляется естественным стремление конструктора решить задачу наилучшим образом, причем так, чтобы как можно в большей степени удовлетворить наибольшее число требований. Такое стремление наталкивается на препятствие противоречивости многих требований, а иногда и взаимоисключительности. Так, повышение дальности полета ЛА неизбежно ведет к повышению его массы, что ухудшает летные характеристики при прочих равных условиях. Это приводит к тому, что в конечном итоге облик ОАТ определяется некоторым компромиссом, жертвованием одних показателей ради достижения других [18]. Насколько обоснована и оправдана такая жертвенность показывает эксплуатация и боевое применение ОАТ. Однако ограничивать создателей в наиболее полном воплощении технических достижений нецелесообразно. Поэтому, принимая во внимание тот факт, что далеко не все и не в полной мере технические достижения могут быть реализованы в конкретном образце техники, будем считать, что рациональные показатели в своей совокупности определяют ТТХ идеального объекта. Причем, эти показатели могут быть такими, что отражают последние достижения науки, техники, технологии или являются перспективными. Поэтому, с учетом изложенных противоречий, такой ОАТ является исключительно идеальным, в том смысле, что вряд ли вообще может быть реализован. Однако каждый показатель в отдельности определяет уровень, к которому следует стремиться, и в тоже время является безотносительным (не связанным с конкретным образцом, технологией, тенденцией), своего рода эталоном для сравнения [8, 9].

В связи с этим для формирования рациональных значений показателей и характеристик ОАТ используются основные методы: интуитивный метод экспертных оценок [19], метод математического моделирования рабочих процессов (численный метод) и метод аналогий (ретроспективный метод, экспериментальные данные). Результаты применения этих методов используются в совокупности и дополняют друг друга таким образом, что там, где не представляется возможным получить значения показателей (или это нецелесообразно) путем экспертных оценок, это осуществляется методом математического моделирования или ретроспективным методом, и наоборот.

Таким образом, применяемый подход по определению рациональных показателей ТТХ представляет собой синтез нескольких известных методов, что позволяет достаточно полно и достоверно формировать набор рациональных значений в соответствии с целью, для достижения которой применяется метод сравнения сложных технических систем по степени рациональности.

Как правило, основными задачами при формировании прогноза с помощью коллектива экспертов являются: формирование репрезентативной экспертной группы, подготовка и проведение экспертизы, статистическая обработка полученных документов. Создание экспертной системы определения параметров, показателей и характеристик ОАТ включает следующие этапы:

1. Выбор количественных и качественных характеристик объекта.
2. Проведение опроса кандидатов в эксперты (анкетирование).
3. Формирование группы экспертов и опросного листа.
4. Проведение опроса экспертов.

**5. Обработка результатов опроса.**

Для определения рациональных значений показателей и характеристик СУ привлекались специалисты из Научного центра ХУПС им. Ивана Кожедуба, НАКУ “ХАИ” им. Н.Е. Жуковского (г. Харьков), ГП “Ивченко-Прогресс” (г. Запорожье), ОАО “Мотор Сич” (г. Запорожье), АНТК им. О.Г. Антонова (г. Киев).

Анкета включала сформированный перечень основных параметров, показателей и характеристик, которые определяют технический облик СУ. Данный перечень является общим для всех типов ГТД, но при конкретном рассмотрении типа двигателя некоторые параметры могут исключаться [20].

При работе группы экспертов рассчитываются среднеарифметические значения весовых коэффициентов, коэффициент конкордации, дисперсия и вариация по каждому показателю. Если коэффициент конкордации позволяет оценить общую согласованность высказываний экспертов, то дисперсия и вариация показывают, по каким показателям наблюдается наибольший разброс мнений. Это позволяет целенаправленно вести работу с экспертами по повышению уровня согласованности.

Однако не все параметры и характеристики удается определить с помощью экспертного подхода. В этом случае чаще всего прибегают к проведению экспериментальных исследований. Но проведение эксперимента для многих режимов течения потока в элементах СУ является трудно осуществимым (иногда практически неосуществимым), так как требует для полного моделирования практически натуральных условий. Особенно наглядно это проявляется при исследовании рабочего процесса при смешении разнотемпературных потоков на срезе сопла авиационных ГТД и воздушного потока, обтекающего элементы планера ЛА. В связи с этим усовершенствована математическая модель течения трехмерного, вязкого, нестационарного турбулентного газового потока [7, 21–27]. Исходя из оценки режимов работы СУ, которая определяет параметры течения потоков на срезе сопла двигателя, для проведения исследований выбрана трехпараметрическая дифференциальная модель турбулентности [28].

Для исследования аэродинамических характеристик системы “СУ–крыло”, а также течения в области закрылков с наличием горячей струи из выходного устройства двигателя, в работе рассмотрена конструктивно-компоновочная схема самолета Ан-70 [29]. Исследуется авиационный двигатель типа Д-27 с двухрядным расположением винтов. Исходя из анализа рабочего процесса в области расположения выходного устройства СУ под крылом самолета [29], предложена новая конструктивно-компоновочная схема смесительно-выходного устройства двигателя, что позволило снизить коэффициент аэродинамического сопротивления системы “мотогондола+крыло” с 0,0125 до 0,0122. Анализ параметрических исследований характеристик течения в области выходного устройства двигателя показывает, что с помощью разработанной методики можно оценить коэффициент аэродинамического сопротивления конструктивно-компоновочной схемы “мотогондола+крыло” на крейсерских режимах полета ЛА военно-транспортного назначения.

Методический подход к решению задачи сравнительного анализа предполагает оценку перспектив развития СУ. В связи с этим проведена оценка технического совершенства СУ с турбовинтовым двигателем (ТВД), представляющим собой модернизируемый объект. Проведена оценка технического совершенства СУ методом весовых коэффициентов, которая включает в себя два этапа: определение перечня показателей, используемых для сравнительного анализа оцениваемого объекта и их весовости. Выбор показателей и характеристик проводился из набора, который определен методом экспертных оценок, исключая из рассмотрения все показатели, имеющие наименьший ранг важности, и оставляя только минимальное их количество. Рассмотренный подход к оценке технического совершенства ОАТ, основанный на сопоставлении показателей сравниваемого объекта с показателями аналога и с учетом их весовых коэффициентов, позволяет:

- проводить анализ влияния каждого отдельного показателя или их совокупности на техническое совершенство образца;
- оценить техническое совершенство нескольких альтернативных вариантов СУ, предложенных к разработке, и выбирать из них наилучший;
- определять соответствие разрабатываемого объекта лучшему аналогу мирового уровня на различных этапах его разработки от составления ТТЗ до испытаний и серийного производства.

Для практического применения разработанного метода оценки уровня технического совершенства по степени рациональности использовались разные типы и поколения двигателей. Для каждого типа двигателя выбирался перечень параметров и характеристик из набора, который установлен экспертным методом. Указывались приведенные СУ с их параметрами и характеристиками. Назначенные экспертами рациональные значения по каждому параметру затем усреднялись путем логарифмирования и последующего потенцирования. Оценка вкладов некоторых параметров в показатель технического совершенства СУ с ТВД приведена на рис. 4. Сравнение показателей технического совершенства показано на рис. 5. Для сравнительной оценки СУ с турбореактивными двухконтурными двигателями выбрано 5 дви-

гательей 4+ поколення. Однак при заповненні даних багато параметри двигателів оказались неізнаними. Компанії-розробники, виробники і підприємства, які виробляють технічне обслуговування, не завжди надають дані по своїм изделиям. Учнтывая тот факт, що практично завжди ізнаними являються тягові і расходні характеристики, то они взяты за основу построения уравнений обобщенных зависимостей, по которым можно определить остальные характеристики.

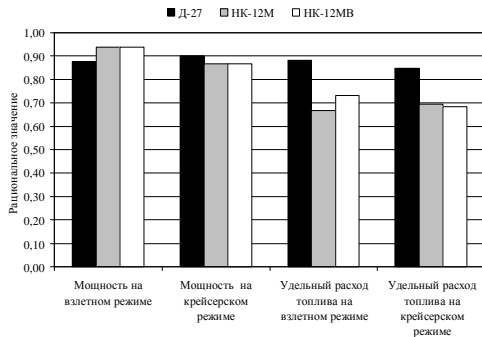


Рисунок 4 – Вклад параметров в показатель технического совершенства

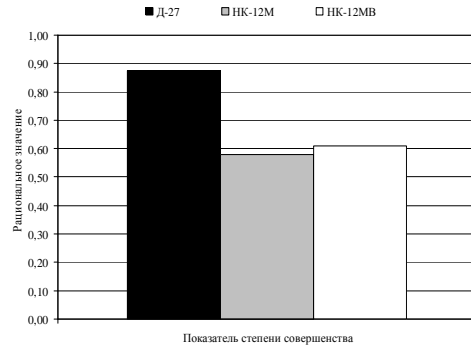


Рисунок 5 – Показатели технического совершенства

Диапазон изменения задаваемых величин взлетной тяги от 0 Н до 800000 Н, удельного расхода топлива – от 0,001 до 0,075 кг/(Н·ч). На основе статистических данных по двигателям 3-его, 4-ого и 4+ поколений (всего около 100 объектов) построены обобщенные уравнения зависимости параметров и характеристик, представленные в табл. 2.

Таблица 2 – Уравнения зависимостей параметров рабочего процесса и характеристик СУ с ТРДД

Уравнение обобщенной зависимости	Достоверность аппроксимации, %
<b>3 поколение</b>	
$M_{дв_{сух}} = -0,00000003 \cdot P_{взл}^2 + 0,0248 \cdot P_{взл} - 57,404$	96,94
$G_{B_{взл}} = 0,000000008 \cdot P_{взл}^2 + 0,0014 \cdot P_{взл} + 3,2268$	97,71
$\pi_{к\Sigma}^* = -0,0016 \cdot (P_{взл} / M_{дв_{сух}})^2 + 0,6391 \cdot (P_{взл} / M_{дв_{сух}}) - 9,0217$	50,31
$\pi_{к\Sigma}^* = 3461 \cdot C_{уд_{взл}}^2 - 674,42 \cdot C_{уд_{взл}} + 42,236$	71,53
$P_{крейс} = -0,0000002 \cdot P_{взл}^2 + 0,2733 \cdot P_{взл} - 1666,8$	96,38
$C_{уд_{крейс}} = 10,244 \cdot C_{уд_{взл}}^2 - 0,3662 \cdot C_{уд_{взл}} + 0,0646$	88,05
$T_{\Gamma}^* = 644,49 \cdot \ln(\pi_{к\Sigma}^*) - 1112,5$	65,92
$V_{дв} = 0,000000002 \cdot P_{взл}^2 + 0,00002 \cdot P_{взл} + 1,1598$	88,9
<b>4 поколение</b>	
$M_{дв_{сух}} = -0,000000005 \cdot P_{взл}^2 + 0,0193 \cdot P_{взл}$	99,8
$G_{B_{взл}} = -0,000000002 \cdot P_{взл}^2 + 0,0035 \cdot P_{взл}$	99,04
$\pi_{к\Sigma}^* = -2047,3 \cdot C_{уд_{взл}}^2 - 335,42 \cdot C_{уд_{взл}} + 39,947$	71,1
$P_{крейс} = -0,00000007 \cdot P_{взл}^2 + 0,2293 \cdot P_{взл}$	98,23
$C_{уд_{крейс}} = -13,666 \cdot C_{уд_{взл}}^2 + 2,2615 \cdot C_{уд_{взл}}$	94,28
$T_{\Gamma}^* = -0,0908 \cdot \pi_{к\Sigma}^{*2} + 32,911 \cdot \pi_{к\Sigma}^* + 5,8534$	97,86
$V_{дв} = 0,0000000003 \cdot P_{взл}^2 + 0,00001 \cdot P_{взл}$	94,26



4+ поколение	
$M_{дв_{сух}} = -0,000000004 \cdot P_{взл}^2 + 0,0201 \cdot P_{взл}$	99,81
$G_{B_{взл}} = -0,0000000009 \cdot P_{взл}^2 + 0,0034 \cdot P_{взл}$	98,81
$\pi_{к\Sigma}^* = -0,0000000000003 \cdot P_{взл}^2 + 0,00008 \cdot P_{взл} + 15,266$	96,05
$P_{крейс} = -0,00000006 \cdot P_{взл}^2 + 0,2201 \cdot P_{взл}$	99,75
$C_{уд_{крейс}} = -14,942 \cdot C_{уд_{взл}}^2 + 2,2581 \cdot C_{уд_{взл}}$	98,45
$T_{\Gamma}^* = -0,1089 \cdot \pi_{к\Sigma}^{*2} + 25,979 \cdot \pi_{к\Sigma}^* + 981,77$	90,21
$V_{дв} = 0,0000000004 \cdot P_{взл}^2 + 0,00006 \cdot P_{взл}$	99,4

Используя метод сравнения по степени рациональности, получены вклады параметров (рис. 6) и показатели степени технического совершенства (рис. 7) для рассматриваемых двигателей.

Для сравнения СУ с турбовальным двигателем выбрано 6 двигателей различного поколения. На основе статистических данных по двигателям 3-его, 4-ого и 4+ поколения (всего около 40 объектов) построены обобщенные уравнения зависимостей параметров и характеристик СУ (табл. 3) Используя метод сравнения по степени рациональности, получены вклады параметров (рис. 8) и показатели степени технического совершенства (рис. 9) для рассматриваемых двигателей.

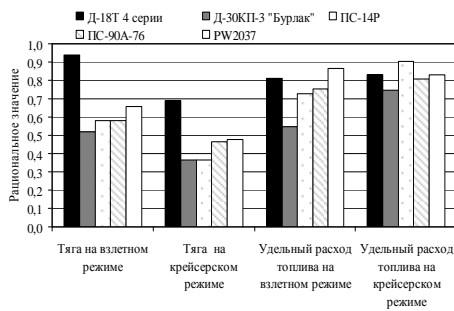


Рисунок 6 – Вклад параметров в показатель технического совершенства

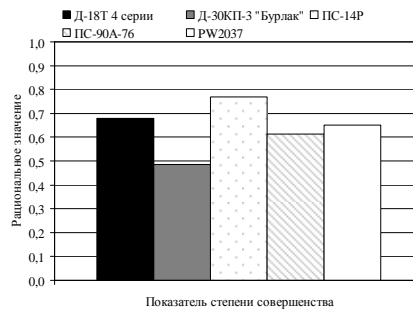


Рисунок 7 – Показатели степени технического совершенства

Таблица 3 – Обобщенные зависимости параметров и характеристик СУ с ТВаД

Уравнения зависимостей для 3, 4 и 4+ поколений	Достоверность аппроксимации, %
$M_{дв_{сух}} = -0,000003 \cdot N_{е_{взл}}^2 + 0,1389 \cdot N_{е_{взл}}$	96,6
$G_{B_{взл}} = -0,00000004 \cdot N_{е_{взл}}^2 + 0,004 \cdot N_{е_{взл}}$	98,72
$\pi_{к\Sigma}^* = 0,0854 \cdot (N_{е_{взл}} / M_{дв_{сух}})^2 + 0,968 \cdot (N_{е_{взл}} / M_{дв_{сух}})$	80,57
$N_{е_{крейс}} = -0,000007 \cdot N_{е_{взл}}^2 + 0,649 \cdot N_{е_{взл}}$	99,59
$C_{е_{крейс}} = -0,899 \cdot C_{е_{взл}}^2 + 1,3498 \cdot C_{е_{взл}}$	96,51
$T_{\Gamma}^* = 0,2148 \cdot (N_{е_{взл}} / M_{дв_{сух}})^2 + 25,761 \cdot (N_{е_{взл}} / M_{дв_{сух}}) + 1001,2$	89,75
$T_{мп} = 0,00001 \cdot T_{назн}^2 + 0,1171 \cdot T_{назн}$	97,64
$NO_x = 0,000000000000000002 \cdot T_{\Gamma}^{*2} + 0,015 \cdot T_{\Gamma}^* + 20$	99,8
$V_{дв} = -0,000000004 \cdot N_{е_{взл}}^2 + 0,0004 \cdot N_{е_{взл}}$	97,87

Из анализа результатов исследований видно, что худшим образцом является двигатель ГТД–350, а наилучшим – ВК–2500. Такая разница в техническом уровне (почти в два раза) определена поколениями создания двигателей. Однако вертолет Ми–2 до сих пор эксплуатируется, а технические характеристики планера имеют уровень, соответствующий вертолетам данного класса. Одним из способов достижения современных требований ЛТХ ЛА является его модернизация. В качестве модернизации предложена замена двигателей ГТД–350 на более современные ГТД – АИ–450. В связи с этим, актуальной становится задача оценки эффективности систем СУ и характеристик модернизированного ЛА. Одним из ключевых вопросов при обеспечении требований к СУ по безопасности полетов вертолета является пожарная безопасность.

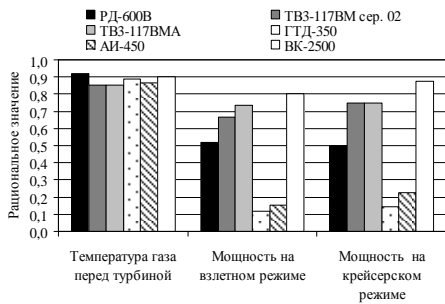


Рисунок 8 – Вклад параметров в показатель технического совершенства

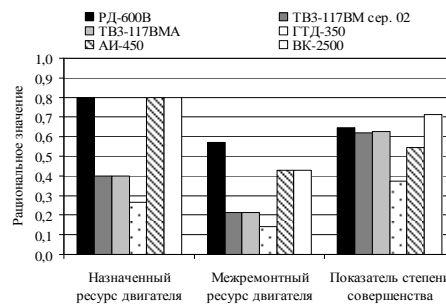


Рисунок 9 – Вклад параметров в показатель технического совершенства

Проведено исследование вопроса размещения и возможность применения противопожарного оборудования вертолета Ми–2. С размещением нового двигателя изменятся эксплуатационные характеристики, как СУ, так и вертолета в целом. Поэтому, учитывая параметрические характеристики и конструктивные особенности двигателей АИ–450 и ГТД–350, проведен анализ теплового состояния поверхностей двигателя на разных режимах работы. Показано, что установка нового двигателя не приведет к ухудшению безопасности полетов вертолета [30, 31]. Кроме того, разработанный подход к оценке пожаробезопасности может быть рекомендован при модернизации с заменой двигателя на других транспортных объектах.

Однако для обеспечения превосходства в области разработки и модернизации СУ для ЛА транспортной авиации будет способствовать ряд технологических революций, которые основаны на результатах предшествующих и продолжающихся работ в различных областях науки и техники. Анализ перспектив развития технического облика СУ интегрируемой с планером при синтезе военно-транспортного самолета показывает, что в области конструктивно-компоновочной схемы “революционность” двигателя будет проявляться в разработке СУ с распределенной системой создания и управления вектором тяги [32]. Такие СУ будут состоять из большого количества мини- или микродвигателей, расположенных вдоль крыла или внутри фюзеляжа и работающих на воздухе из пограничного слоя. Они будут иметь высокую степень интеграции и являться неотъемлемой частью планера ЛА. В силу малых размеров и широкого применения композиционных материалов мини- и микродвигатели будут обладать низкой массой и стоимостью. Воздухозаборник и сопло таких СУ будут иметь высокое относительное удлинение, в них будет осуществляться управление течением, а в их конструкции будут широко применяться композиционные материалы.

**Выводы.** Таким образом, в результате проведенных комплексных теоретических и экспериментальных исследований, разработан научно-методический аппарат комплексного метода параметрической интеграции силовой установки и элементов планера ЛА, который основывается на всестороннем учете взаимного влияния характеристик рабочих процессов СУ и элементов планера ЛА. Анализ выполненных научно-технических исследований показывает, что разработанный комплексный подход и методический аппарат для формирования технического облика СУ интегрируемой с планером при синтезе ЛА военно-транспортного назначения позволяет прогнозировать интегративные свойства ЛА на ранних стадиях проектирования. Разработанный подход может быть применен к другим техническим системам типа “подвижная платформа–силовая установка”. Поэтому метод оценки уровня технического совершенства объектов по степени рациональности имеет самостоятельное значение и может быть применен для решения подобных задач.

Литература

1. Флоров И.Ф. Методы оценки эффективности применения двигателей в авиации / И.Ф. Флоров // Труды ЦИАМ № 1099. – 1985. – 260 с.

2. Анипко О.Б. Интеграция характеристик силовой установки и планера летательного аппарата: проблемы и пути их решения / О.Б. Анипко, В.В. Логинов // *Авіаційно-космічна техніка та технологія*. – Харків: НАКУ ім. М.С. Жуковського “ХАІ”. – 2006. – №2(28). – С. 59–65.
3. Логинов В.В. Анализ применения силовых установок на самолетах транспортной авиации / В.В. Логинов // *Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов*. – Харків: НАКУ ім. М.С. Жуковського “ХАІ”. – 2006. – №1(44). – С. 74–78.
4. Петров А.В. Интеграция силовой установки и планера транспортных самолетов короткого взлета и посадки: Сборник тезисов 2-ой международной научно-технической конференции “Авиадвигатели XXI века”. Т.1 / А.В. Петров. – М.: ЦИАМ. – 2005. – С. 260–261.
5. Луковников А.В. Методология формирования технического облика силовых установок летательных аппаратов / А.В. Луковников // *Полет*, 2007. – №7. – С. 28–38.
6. Югов О.К. Основы интеграции самолета и двигателя / О.К. Югов, О.Д. Селиванов. – М.: Машиностроение, 1989. – 304 с.
7. Анипко О.Б. Интеграция силовой установки и планера как комплексная проблема синтеза летательного аппарата / О.Б. Анипко, В.В. Логинов // *Інтегровані технології та енергозбереження*. – 2007. – №1. – С. 46–53.
8. Анипко О.Б. Концептуальное проектирование объектов бронетанковой техники: монография / О.Б. Анипко, М.Д. Борисюк, Ю.М. Бусяк. – Харьков: НТУ “ХПИ”. – 2008. – 196 с.
9. Захаров В.Д. Концептуальный анализ в военном кораблестроении / В.Д. Захаров. – Санкт-Петербург. – 2004. – 286 с.
10. Подиновский В.В. Паретооптимальные решения многокритериальных задач / В.В. Подиновский, В.Д. Ногин. – М.: Наука, 1982. – 232 с.
11. Макаров И.М. Теория выбора и принятия решения / И.М. Макаров, Т.М. Виноградская. – М.: Наука, 1982. – 316 с.
12. Матвиевский С.Ф. Основы системного проектирования комплексов летательных аппаратов / С.Ф. Матвиевский. – М.: Машиностроение, 1987. – 328 с.
13. Анипко О.Б. Коэффициент интеграции для анализа степени технического совершенства конструктивно-компоновочных решений летательного аппарата / О.Б. Анипко, В.В. Логинов // *Інтегровані технології та енергозбереження*. – Харків: НТУ “ХПИ”, 2007. – №3. – С. 79–91.
14. Анипко О.Б. Рациональные теплообменные поверхности / О.Б. Анипко. – Харьков: ХВУ, 1998. – 186 с.
15. ТОВАЖНЯНСКИЙ Л.Л. Метод сравнения транспортных теплообменных аппаратов по степени рациональности / Л.Л. ТОВАЖНЯНСКИЙ, О.Б. АНИПКО // *Інтегровані технології та енергозбереження*. – 1999. – №1. – С. 64–69.
16. Анипко О.Б. Оценка технического совершенства и рыночной привлекательности объекта авиационной техники по степени рациональности / О.Б. Анипко, В.В. Логинов // *Інтегровані технології та енергозбереження*. – Харків: НТУ “ХПИ”. – 2006. №2. – С. 140–147.
17. Алпатов В.Е. Оценка степени технико-экономического совершенства силовой установки и ее конкурентоспособности / В.Е. Алпатов, О.Б. Анипко, В.В. Логинов // *Інтегровані технології та енергозбереження*. – Харків: НТУ “ХПИ”. – 2007. – №3. – С. 66–70.
18. Попов И.А. Системная многокритериальная методология построения компромиссного варианта большой технической системы / И.А. Попов, А.К. Мицитис. – К.: КИ ВВС, 1996. – 71 с.
19. Литвак Б.Г. Экспертная информация: методы получения и анализа / Б.Г. Литвак. – М.: Радио и связь, 1982. – 184 с.
20. Анипко О.Б. К вопросу о рациональном диапазоне параметров авиационной силовой установки / О.Б. Анипко, В.В. Логинов, В.В. Зубарев // *Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов*. – Харків: НАКУ ім. М.С. Жуковського “ХАІ”. – 2007. – №1(48). – С. 34–41.
21. Теория турбулентных струй / Под ред. Г.Н. Абрамовича. – М.: Наука. – 1984. – 715 с.
22. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа / Л.Г. Лойцянский. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. литературы, 1987. – 840 с.
23. Логинов В.В. Моделирование течения в форсажной камере сгорания авиационного двигателя / В.В. Логинов, В.И. Рублёв // *Інтегровані технології та енергозбереження*. – Харків: НТУ “ХПИ”. – №4. – 2004. – С. 60–66.
24. Логинов В.В. Численное моделирование течения газа в выходных патрубках газотурбинных установок / В.В. Логинов, В.И. Рублёв // *Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов*. – Харків: НАКУ ім. М.С. Жуковського “ХАІ”. – 2005. – № 40(1). – С. 33–39.

25. Логинов В.В. Численное моделирование течения в межкаскадном канале турбореактивного двухконтурного двигателя / В.В. Логинов, В.И. Рублёв // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов. – Харків: НАКУ ім. М.С. Жуковського “ХАІ”. – 2005. – № 41(2). – С. 23–29.
26. Логинов В.В. Оценка точности численного метода при исследовании обтекания крыла воздушным потоком / В.В. Логинов // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов. – Харків: НАКУ ім. М.С. Жуковського “ХАІ”. – 2008. – №1(52). – С. 83–87.
27. Анипко О.Б. Анализ характеристик крыла, обдуваемого струей от винта двигателя / О.Б. Анипко, В.В. Логинов // Збірник наукових праць ХУПС. – Харків: ХУПС. – 2008. – №1(16). – С. 12–14.
28. Уилкоккс Д.К. Уточнение уравнения для масштаба турбулентности в перспективных моделях турбулентности / Д.К. Уилкоккс // Аэрокосмическая техника, 1989. – Т.11. – С. 30–46.
29. Анипко О.Б. Анализ рабочего процесса в области среза выходного устройства двигателя, расположенного под крылом самолета / О.Б. Анипко, В.В. Логинов // Інтегровані технології та енергозбереження. – Харків: НТУ “ХПІ”. – 2008. – №2. – С. 37–50.
30. Логинов В.В. Оценка возможности обледенения элементов входного устройства газотурбинного двигателя / В.В. Логинов, О.В. Кислов // Інтегровані технології та енергозбереження. – Харків: НТУ “ХПІ”. – №4. – 2005. – С. 61–65.
31. Анипко О.Б. Сравнительная оценка эффективности противопожарной системы двигательного отсека силовой установки вертолета Ми-2 с новым двигателем АИ-450 / О.Б. Анипко, В.В. Логинов, В.Е. Алпатов // Інтегровані технології та енергозбереження. – Харків: НТУ “ХПІ”. – 2006. – №1. – С. 50–60.
32. Работы ведущих авиационных двигателестроительных компаний по созданию перспективных авиационных двигателей. /Под общей редакцией В.А. Скибина. – М.: ЦИАМ, 2004. – 254 с.

Bibliography (transliterated)

1. Florov I.F. Metody ocenki jeffektivnosti primenenija dvigatelej v aviacii I.F. Florov Trudy CIAM # 1099. – 1985. – 260 p.
2. Anipko O.B. Integracija harakteristik silovoj ustanovki i planera letatel'nogo apparata: problemy i puti ih reshenija O.B. Anipko, V.V. Loginov Aviacijno-kosmichna tehnika ta tehnologija. – Harkiv: NAKU im. M.S. Zhukovskogo “HAI”. – 2006. – #2(28). – С. 59–65.
3. Loginov V.V. Analiz primenenija silovyh ustanovok na samoletah transportnoj aviacii V.V. Loginov Voprosy proektirovanija i proizvodstva konstrukcij letatel'nyh apparatov. – Harkiv: NAKU im. M.S. Zhukovskogo “HAI”. – 2006. – #1(44). – p. 74–78.
4. Petrov A.V. Integracija silovoj ustanovki i planera transportnyh samoletov korotkogo vzleta i posadki: Sbornik tezisov 2–oj mezhdunarodnoj nauchno–tehničeskoj konferencii “Aviadviga-teli XXI veka”. T.1 A.V. Petrov. – М.:CIAM. –2005. – p. 260–261.
5. Lukovnikov A.V. Metodologija formirovanija tehničeskogo oblika silovyh ustanovok leta-tel'nyh apparatov A.V. Lukovnikov Polet, 2007. – #7. – p. 28–38.
6. Jugov O.K. Osnovy integracii samoleta i dvigatelja O.K. Jugov, O.D. Selivanov. – М.: Mashinostroenie, 1989. – 304 p.
7. Anipko O.B. Integracija silovoj ustanovki i planera kak kompleksnaja problema sinteza le-tatel'nogo apparata / O.B. Anipko, V.V. Loginov Integrovani tehnologii ta energozberezhennja. – 2007. – #1. – p. 46–53.
8. Anipko O.B. Konceptual'noe proektirovanie ob"ektov bronetankovoj tehniki: monografija / O.B. Anipko, M.D. Borisjuk, Ju.M. Busjak. – Har'kov: NTU “HPI”. – 2008. – 196 p.
9. Zaharov V.D. Konceptual'nyj analiz v voennom korablestroenii V.D. Zaharov. – Sankt Peterburg. – 2004. – 286 p.
10. Podinovskij V.V. Paretooptimal'nye reshenija mnogokriterial'nyh zadach / V.V. Podinovskij, V.D. Negin. – М.: Nauka, 1982. – 232 p.
11. Makarov I.M. Teorija vybora i prinjatija reshenija I.M. Makarov, T.M. Vinogradskaja. – М.: Nauka, 1982. – 316 p.
12. Matvievskij S.F. Osnovy sistemnogo proektirovanija kompleksov letatel'nyh apparatov S.F. Matvievskij. – М.: Mashinostroenie, 1987. – 328 p.
13. Anipko O.B. Kojefficient integracii dlja analiza stepeni tehničeskogo sovershenstva konstruktivno–komponovochnyh reshenij letatel'nogo apparata O.B. Anipko, V.V. Loginov Integrovani tehnologii ta energozberezhennja. – Harkiv: NTU “HPI”, 2007. – #3. – p. 79–91.
14. Anipko O.B. Racional'nye teploobmennye poverhnosti O.B. Anipko. □ Har'kov: HVU, 1998. – 186 p.

15. Tovazhnjanskij L.L. Metod sravnenija transportnyh teploobmennyh apparatov po stepeni racional'nosti / L.L. Tovazhnjanskij, O.B. Anipko Integrovani tehnologii ta energozberezhenija. – 1999. – #1. – p. 64–69.
16. Anipko O.B. Ocenka tehničeskogo sovershenstva i rynochnoj privlekatel'nosti ob'ekta aviacionnoj tehniki po stepeni racional'nosti O.B. Anipko, V.V. Loginov Integrovani tehnologii ta energozberezhenija. – Harkiv: NTU "HPI". – 2006. #2. – p. 140–147.
17. Alpatov V.E. Ocenka stepeni tehniko-jekonomičeskogo sovershenstva silovoj ustanovki i ee konkurentosposobnosti V.E. Alpatov, O.B. Anipko, V.V. Loginov Integrovani tehnologii ta ener-gozberezhenija. – Harkiv: NTU "HPI". – 2007. – #3. – p. 66–70.
18. Popov I.A. Sistemnaja mnogokriterial'naja metodologija postroenija kompromissnogo va-rianta bol'shoj tehničeskoy sistemy I.A. Popov, A.K. Micitis. – K.: KI VVS, 1996. – 71 p.
19. Litvak B.G. Jekspertnaja informacija: metody poluchenija i analiza B.G. Litvak. – M.: Radio i svjaz', 1982. – 184 p.
20. Anipko O.B. K voprosu o racional'nom diapazone parametrov aviacionnoj silovoj usta-novki O.B. Anipko, V.V. Loginov, V.V. Zubarev Voprosy proektirovanija i proizvodstva konstrukcij letatel'nyh apparatov. – Harkiv: NAKU im. M.C. Zhukovskogo "HAI". – 2007. – #1(48). – p. 34–41.
21. Teorija turbulentnyh struj / Pod red. G.N. Abramovicha. – M.: Nauka. –1984. –715 p.
22. Lojczjanskij L.G. Mehanika zhidkosti i gaza L.G. Lojczjanskij. – M.: Nauka. Gl. red. fiz.-mat. litera-tury, 1987. – 840 p.
23. Loginov V.V. Modelirovanie techenija v forsazhnoj kamere sgoranija aviacionnogo dvigate-lja V.V. Loginov, V.I. Rubljov Integrovani tehnologii ta energozberezhenija. – Harkiv: NTU "HPI". – #4. – 2004. – p. 60–66.
24. Loginov V.V. Chislennoe modelirovanie techenija gaza v vyhodnyh patrubkah gazoturbinnih usta-novok / V.V. Loginov, V.I. Rubljov Voprosy proektirovanija i proizvodstva konstrukcij letatel'nyh apparatov. – Harkiv: NAKU im. M.C. Zhukovskogo "HAI". – 2005. – # 40(1). – p. 33–39.
25. Loginov V.V. Chislennoe modelirovanie techenija v mezkhaskadnom kanale turboreaktivnogo dvuhkonturnogo dvigatelja V.V. Loginov, V.I. Rubljov Voprosy proektirovanija i proizvodstva konst-rukcij letatel'nyh apparatov.– Harkiv: NAKU im. M.C. Zhukovskogo "HAI".– 2005.– # 41(2).– p. 23–29.
26. Loginov V.V. Ocenka tochnosti chislennoho metoda pri issledovanii obtekanija kryla voz-dushnym potokom / V.V. Loginov Voprosy proektirovanija i proizvodstva konstrukcij letatel'nyh apparatov. – Harkiv: NAKU im. M.C. Zhukovskogo "HAI". – 2008. – #1(52). – p. 83–87.
27. Anipko O.B. Analiz harakteristik kryla, obduvaemogo struej ot vinta dvigatelja / O.B. Anipko, V.V. Loginov Zbirnik naukovih prac' HUPS. – Harkiv: HUPS. –2008. – #1(16). – p. 12–14.
28. Uilkoks D.K. Utochnenie uravnenija dlja masshtaba turbulentnosti v perspektivnyh mode-ljah tur-bulentnosti / D.K. Uilkoks Ajerokosmicheskaja tehnika, 1989. – T.11. – p. 30–46.
29. Anipko O.B. Analiz rabocheho processa v oblasti sreza vyhodnogo ustrojstva dvigatelja, raspolo-zhennogo pod krylom samoleta O.B. Anipko, V.V. Loginov Integrovani tehnologii ta energoz-berezhenija. – Harkiv: NTU "HPI". – 2008. – #2. – p. 37–50.
30. Loginov V.V. Ocenka vozmozhnosti obledenenija jelementov vhodnogo ustrojstva gazotur-binnogo dvigatelja V.V. Loginov, O.V. Kislov Integrovani tehnologii ta energozberezhenija. – Harkiv: NTU "HPI". – #4. – 2005. – p. 61–65.
31. Anipko O.B. Sravnitel'naja ocenka jeffektivnosti protivopozharnoj sistemy dvigatel'-nogo otseka si-lovoj ustanovki vertoleta Mi–2 s novym dvigatelem AI–450 O.B. Anipko, V.V. Loginov, V.E. Alpatov Integrovani tehnologii ta energozberezhenija. – Harkiv: NTU "HPI". – 2006. – #1. – p. 50–60.
32. Raboty vedushhijh aviacionnyh dvigatelestroitel'nyh kompanij po sozdaniju perspektiv-nyh avia-cionnyh dvigatelej. /Pod obshhej redakciej V.A. Skibina. – M.: CIAM, 2004. – 254 s.

УДК 621.45.02.024:05.054

Логінов В.В.

### **КОМПЛЕКСНИЙ ПІДХІД ПО ФОРМУВАННЮ ТЕХНІЧНОГО ОБРИСУ СИЛОВОЇ УСТАНОВКИ, ІНТЕГРОВАНОЇ В ПЛАНЕР, ПРИ СИНТЕЗІ ЛІТАЛЬНОГО АПАРАТУ**

*Харківський університет Повітряних Сил ім. Івана Кожедуба*

Розроблений комплексний підхід і методичний апарат для формування технічного обриса сило-вої установки інтегрованої з планером при синтезі літального апарату військово-транспортного призна-

чення. Розроблений метод оцінки рівня технічної досконалості об'єктів авіаційної техніки за ступенем раціональності. Приведені результати рішення практичних задач при обґрунтуванні рівня технічної досконалості об'єктів авіаційної техніки за ступенем раціональності. Показані результати комплексних теоретичних і експериментальних досліджень за допомогою розробленого науково-методичного апарату комплексного методу параметричної інтеграції основних підсистем літака. Розроблений комплексний підхід дозволяє спрогнозувати інтеграційні властивості ЛА на ранніх стадіях проектування і може бути застосований до інших технічних систем типу "рухома платформа–силова установка".

Loginov V.V.

**COMPREHENSIVE APPROACH TO FORMING THE TECHNICAL APPEARANCE OF THE POWER DEVICE INTEGRATED INTO THE FRAME IN THE COURSE OF AIRCRAFT SYNTHESIS**

*Ivan Kozhedub Air Force University, Kharkiv*

A comprehensive approach and methods for forming the technical appearance of the power device integrated into the frame in the course of military and transportation aircraft synthesis have been developed. A method to assess the technical excellence level for aircrafts by the degree of their efficiency has been developed. The article also describes solutions for real tasks emerging when the excellence level for aircrafts is substantiated by the degree of their efficiency. It also discloses the results of comprehensive analytical and experimental studies based on the developed research and methodic approach to the comprehensive method of parametric integration for major aircraft subsystems. The developed comprehensive approach makes it possible to forecast integrative properties of an aircraft at the early design stages and can be applied to other technical systems such as "mobile platform – power device."

Анипко О.Б., Українець Е.А.

**ПОКАЗАТЕЛЬ ИНФРАКРАСНОЙ ЗАМЕТНОСТИ БОЕВЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ  
ДЛЯ ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ КОНСТРУКТИВНО-КОМПОНОВОЧНЫХ РЕШЕНИЙ  
НА ЗАМЕТНОСТЬ**

**Актуальность и постановка задачи.** Для обнаружения воздушных целей успешно используются оптико-электронные системы, работающие в инфракрасной (ИК) области спектра. Высокое пространственное разрешение при малой массе и габаритах, малой потребляемой мощности и высокой скрытности вследствие работы в пассивном режиме обуславливают их достоинства в сравнении с радиолокационными системами [1]. Недостатком тепловизионных систем является зависимость их эффективности от метеорологических условий и характера излучения цели в ИК диапазоне спектра.

**Цель исследования.** При многовариантных проработках компоновок ЛА боевой авиации перед разработчиком стоит задача удовлетворения заданным тактико-техническим характеристикам при максимально возможном снижении уровня всех видов заметности, в том числе, инфракрасной. Целью исследования является разработка показателя ИК заметности ЛА боевой авиации для оценки влияния принимаемых на начальной стадии синтеза ЛА конструктивно-компоновочных решений на уровень заметности.

Известно, что излучение ЛА складывается из собственного излучения и отраженного излучения Солнца и фона. В ИК области спектра собственное излучение существенно превосходит переотраженное излучение фона, которым будем в дальнейшем пренебрегать. Основными источниками собственного ИК излучения являются (рис. 1):

- сопла турбореактивных двигателей;
- реактивная струя;
- планер самолета, вследствие аэродинамического нагрева.

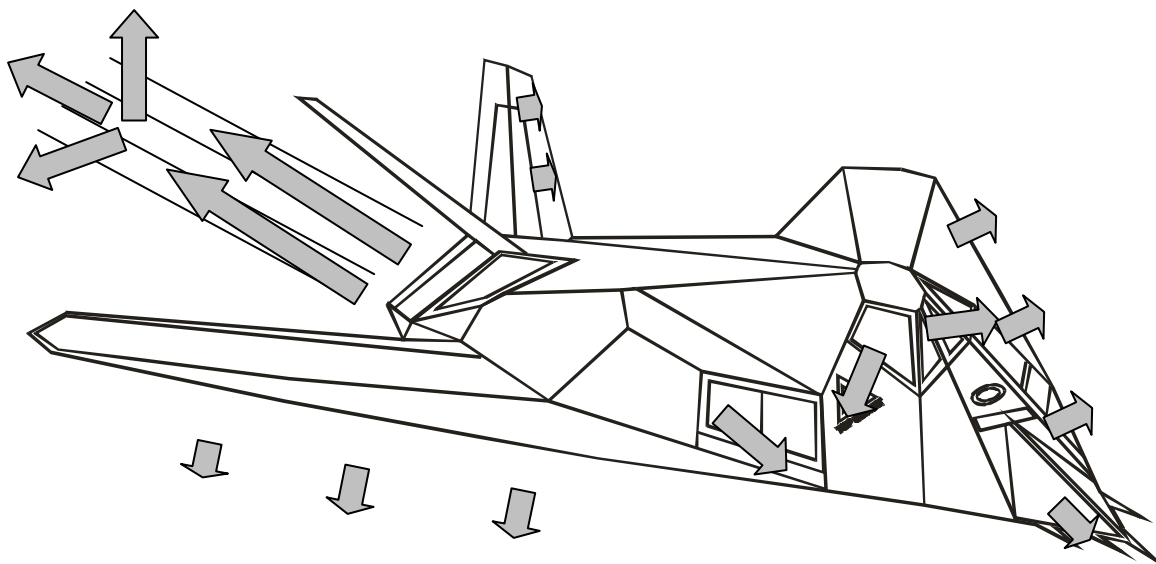


Рисунок 1 – Основные источники собственного ИК излучения самолета

Наиболее важный из этих источников – горячие части реактивного двигателя (турбина и сопло). Излучение струи сосредоточено главным образом в спектральных областях излучения основных продуктов сгорания – паров воды и углекислого газа. Вклад излучения планера вследствие его аэродинамического нагрева в общее излучение зависит от режима полета и условий наблюдения. Горячие лопатки турбины и стенки канала сопла находятся внутри планера самолета, термоизолированы, экранированы и

значительная часть их излучения поглощается другими, более холодными элементами. Однако [1] определенная часть излучения в задней полусфере, достигает наблюдателя из-за прямой видимости горячих элементов и переотражения от поверхности сопла.

Параметры, от которых зависит ИК излучение, оказывают на его величину различное влияние. Так, величина излучения меняется пропорционально изменению площади и коэффициенту излучения и, согласно закону Стефана-Больцмана [2], пропорциональна четвертой степени абсолютной температуры. Излучение струи складывается из излучения начальной зоны смешения и зависит от профиля температур излучающего объема газа и парциальных давлений излучающих компонентов струи – в основном углекислого газа и паров воды. Концентрация основных излучающих компонентов, а также наличие и концентрация прочих излучающих компонентов определяются параметрами двигателя, режимом его работы и характеристиками используемого топлива. Следовательно, собственное излучение ЛА определяется распределением абсолютных значений температуры, оптическими характеристиками его элементов, его геометрией и концентрацией продуктов сгорания [1].

Показатель инфракрасной заметности для оценки влияния принимаемых конструктивно-компоновочных решений на инфракрасную заметность боевых летательных аппаратов представим в виде:

$$Z_j = \left( \frac{T_{\Gamma}^*}{T_{\Gamma_{\max}}^*} \right)^4 \left( \frac{1}{1+m} \right)^5 k_F k_c k_{mn}, \quad (1)$$

где  $T_{\Gamma}^* = 2200$  К – температура горения стехиометрической керосиново-воздушной смеси;  $T_{\Gamma_{\max}}^*$  – максимально допустимая температура газов за камерой сгорания двигателей ЛА;  $m$  – степень двухконтурности. Степень двухконтурности, подставляемая в показатель ИК заметности, увеличивается по сравнению со степенью двухконтурности двигателей в случае переразмеренных воздухозаборников силовой установки, использования схемы двухконтурного двигателя без смешения потоков (F-22A) и использования избыточного воздуха для охлаждения в соплах двигателей с целью уменьшения ИК заметности (F-117A);  $k_F = 15 \dots 20$  – коэффициент использования форсажного режима двигателя. Такое увеличение показателя ИК заметности связано с возрастанием ИК излучения при использовании форсажного режима, большего на порядок, чем прирост тяги [1];  $k_c = 0,5 \dots 1$  – коэффициент формы сопла двигателя, меньшие значения соответствуют плоским соплам с большим отношением сторон (F-117A, B-2A, F-22A), большие значения – осесимметричным соплам;  $k_{mn} = 0,5 \dots 1$  – коэффициент качества принимаемых конструктивно-компоновочных решений по снижению ИК излучения двигателя.

Может показаться парадоксальным обратное отношение температур в показателе ИК заметности, однако в данном случае обратное отношение температур характеризует совершенство двигателя, как тепловой машины, а изменения цикла двигателя, ведущие к улучшению теплового к.п.д., как известно, снижают уровень ИК излучения [1].

На рис. 2 представлена зависимость показателя инфракрасной заметности  $Z_j$  от показателя радиолокационной заметности ЛА  $Z$  [3].

Анализ представленной зависимости позволяет сделать следующие выводы:

– вербальное требование снижения всех составляющих заметности (радиолокационной, инфракрасной, акустической и визуальной) может быть выражено формально через показатели заметности. Так, для наиболее распространенных способов обнаружения ЛА боевой авиации [4, 5], их взаимная связь через показатели радиолокационной и инфракрасной заметности может быть представлена в следующем виде:

$$Z_j = 0,042Z^3 - 0,35Z^2 + 1,03Z - 0,7177, \quad (2)$$

величина достоверности аппроксимации в диапазоне величины компоновочного показателя  $Z$  от 0,92 до 4,15:



$$R^2 = 0,8321; \quad (3)$$

– существует противоречие между необходимостью уменьшения степени двухконтурности двигателей для обеспечения сверхзвукового крейсерского полета при увеличенном из-за внутреннего размещения вооружения и переразмеренного крыла сопротивлении малозаметного самолета, и необходимостью увеличения степени двухконтурности двигателей, как эффективного средства снижения ИК заметности. Это противоречие может быть разрешено применением регулируемых (F-22A, YF-23) и нерегулируемых плоских сопел (F-117A), имеющих меньшую газодинамическую эффективность, применением переразмеренных воздухозаборников для охлаждения сопел (F-117A), имеющих большее внешнее сопротивление;

– использование форсажного режима непропорционально увеличивает ИК заметность самолета и должно быть ограничено взлетно-посадочными режимами, маневрированием в воздушном бою.

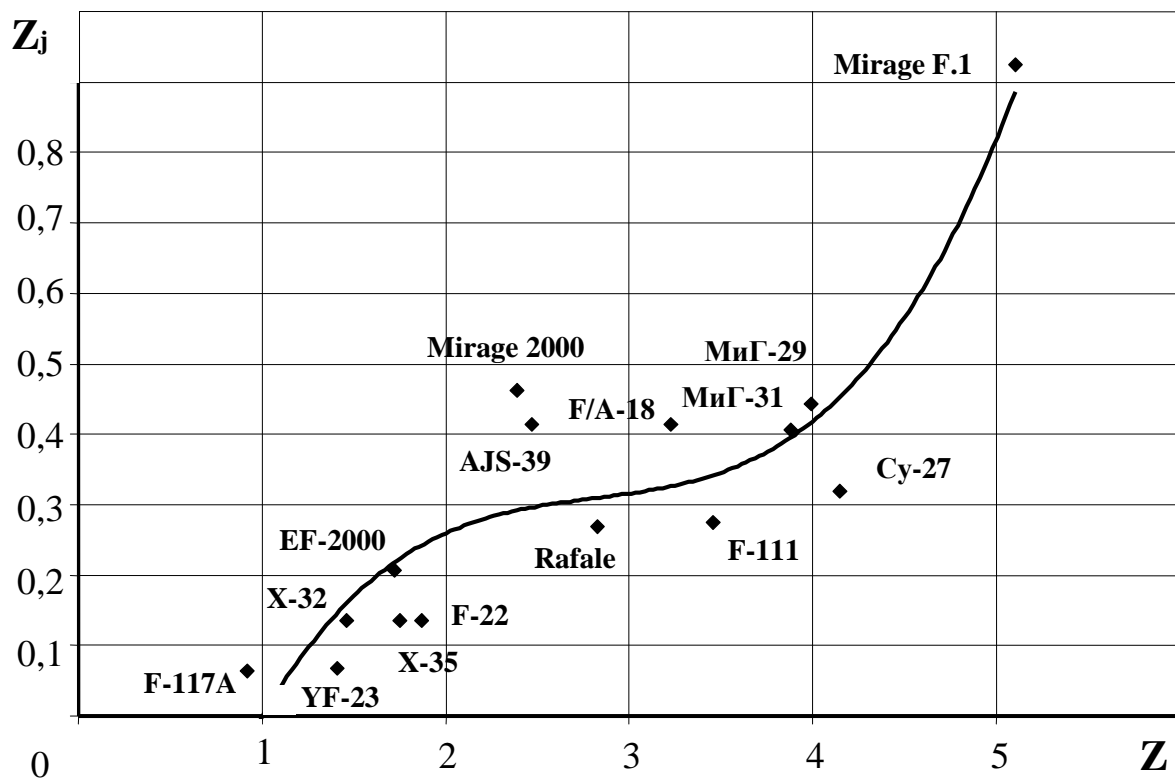


Рисунок 2 – Зависимость показателя инфракрасной заметности от показателя радиолокационной заметности боевых ЛА

**Выводы.** Таким образом, для оценки конструктивно-компоновочных решений, принимаемых на начальной стадии синтеза ЛА разработан показатель ИК заметности ЛА боевой авиации. Показана взаимная связь радиолокационной и инфракрасной заметности, получено аналитическое выражение взаимосвязи их показателей. В дальнейшем предполагается разработка показателей оптической и акустической заметности ЛА боевой и военно-транспортной авиации. На основе этого может быть построена многомерная область вариантов соотношений аэродинамических характеристик и заметности ЛА в радиолокационном, инфракрасном, оптическом и акустическом диапазонах спектра.

#### Литература

1. Гальцев А.П. Заметность летательных аппаратов в ИК области спектра / А.П. Гальцев, А.П. Мороз, И.Г. Косарева // Обзор ЦАГИ. – № 628. – 1983. – № 628. – 64 с.

2. Крейг Ф. Основы теплопередачи: Пер. с англ. / Ф. Крейг, У. Блэк. – М.: Мир, 1983. – 512 с.
3. Анипко О.Б. Показатель радиолокационной заметности для оценки влияния принимаемых конструктивно-компоновочных решений на радиолокационную заметность / О.Б. Анипко, Е.А. Украинец // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов. – Харьков: НАКУ «ХАИ», 2008. – № 1(52). – С. 7–14.
4. Гусейнов А.Б. Показатели заметности летательных аппаратов и способы их снижения: [учебное пособие] / А.Б. Гусейнов, И.Е. Перков. – М.: МАИ, 2005. – 95 с.
5. Способы оценки радиолокационной и ИК заметности самолетов // Техническая информация ЦАГИ. – 1988. – № 11(1585). – С. 1–9.

Bibliography (transliterated)

1. Gal'cev A.P. Zametnost' letatel'nyh apparatov v IK oblasti spektra A.P. Gal'cev, A.P. Moroz, I.G. Kosareva Obzor CAGI. – # 628. – 1983. – # 628. – 64 p.
2. Krejg F. Osnovy teploperedachi: Per. s angl. / F. Krejg, U. Bljek. – М.: Mir, 1983. – 512 p.
3. Anipko O.B. Pokazatel' radiolokacionnoj zametnosti dlja ocenki vlijanija prinimaemyh konstruktivno-komponovochnyh reshenij na radiolokacionnuju zametnost' O.B. Anipko, E.A. Ukrainec Voprosy proektirovanija i proizvodstva konstrukcij letatel'nyh apparatov. – Har'kov: NAKU «HAI», 2008. – # 1(52). – p. 7–14.
4. Gusejnov A.B. Pokazатели zametnosti letatel'nyh apparatov i sposoby ih snizhenija: [ucheb-noe posobie] A.B. Gusejnov, I.E. Perkov. – М.: MAI, 2005. – 95 p.
5. Sposoby ocenki radiolokacionnoj i IK zametnosti samoletov Tehnicheskaja informacija CAGI. – 1988. – # 11(1585). – p. 1–9.

УДК 629.7.022; 623.624.9

Аніпко О.Б., Українець Е.А.

**ПОКАЗНИК ІНФРАЧЕРВОНОЇ ПОМІТНОСТІ БОЙОВИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ ДЛЯ  
ОЦІНКИ ВПЛИВУ КОНСТРУКТИВНО-КОМПУНУВАЛЬНИХ РІШЕНЬ НА ПОМІТНІСТЬ**

При багатоваріантних опрацюваннях компоновок ЛА бойової авіації перед розробником стоїть задача задоволення заданим тактико-технічним характеристикам при максимально можливому зниженні рівня всіх видів помітності, у тому числі, інфрачервоної. Для оцінки конструктивно-компоновальних рішень, що приймаються початкової стадії синтезу ЛА розроблено показник інфрачервоної помітності ЛА бойової авіації. Показаний взаємний зв'язок радіолокаційної і інфрачервоної помітності, отримано аналітичне вираження взаємозв'язку їх показників.

Anipko O.B., Ukrainets E.A.

**INDEX OF INFRA-RED VIEWING OF BATTLE AIRCRAFTS FOR ESTIMATION  
OF IMPACT OF STRUCTURAL-ARRANGEMENT DECISIONS ON VIEWING**

The task of conformity of definite tactics-technical characteristics at the maximally possible descent of level of all types of viewing, including, infra-red stands before a developer during the multiple researches of arrangements of battle aircrafts. The index of infra-red viewing of battle aircrafts is developed for estimation of the structural-arrangement decisions accepted on the initial stage of the aircraft synthesis. The interconnection of radio-location and infra-red viewing is shown; analytical expression of connection of their indexes is got.

**ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЭНЕРГИИ В ИМПУЛЬСНОМ ВЗРЫВОМАГНИТНОМ ГЕНЕРАТОРЕ**

Успешное решение многих практических задач построения современных радиотехнических систем связано с необходимостью создания новых источников питания, обеспечивающих передачу высоких значений энергий на нагрузку. Развитие данного направления исследования привело к созданию взрывомагнитных генераторов (ВМГ) мощных импульсов электрического тока [1–5]. В основе принципа действия ВМГ лежит явление пространственного сжатия магнитного потока под действием сверхвысоких давлений, образующихся при детонации взрывчатого вещества (ВВ). Использование в ВМГ продуктов детонации (ПД) взрывчатого вещества в качестве привода якоря обычного генератора и создания магнитного поля собственным током генератора, делает возможным значительно миниатюризировать такие источники питания при сохранении высоких значений энергии на нагрузке (до 100 Дж) [2–4]. Вследствие чрезвычайно высоких значений энергий ВМГ уничтожаются во время применения [1–5]. Однако в целом ряде случаев только они могут решить задачи питания генераторов мощного СВЧ-излучения, источников сильноточных пучков электронов и протонов для ускорителей, источников питания мощных лазеров [3–5].

**Актуальность и цель исследования.** В последнее время появилось достаточно много публикаций, связанных с возможностью работы ВМГ с высокоимпедансными нагрузками, применяемыми как в геофизических средствах прогнозирования землетрясений и поиска полезных ископаемых, так и в некоторых современных методах ведения радиоэлектронной борьбы [2–5]. Выбор и применение ВМГ в данных методах неразрывно связан с возможностью получения максимально возможной энергии на высокоимпедансной нагрузке. Поэтому в данной работе представлены результаты исследования преобразования энергии в замкнутом контуре импульсного ВМГ.

Для анализа физических процессов, происходящих при взрывном сжатии контура с током, рассмотрим структуру, представленную на рисунке 1.

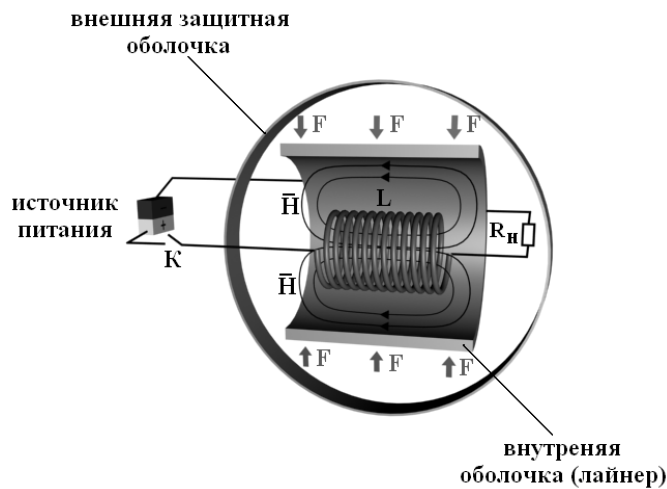


Рисунок 1 – Схема преобразования энергии в ВМГ

Данная структура имеет в своем составе некоторую замкнутую область  $V$ , ограниченную прочной защитной оболочкой, в которую помещен соленоид  $L$ . Снаружи данной структуры размещается ВВ. Кроме индуктивности данная структура содержит и активное сопротивление нагрузки  $R_n$ . При замкнутом ключе  $K$  соленоид  $L$  через внутреннюю оболочку (лайнер) подключается к источнику постоянного тока с ЭДС  $\mathcal{E}_0$  (см. рисунок 1). В результате в соленоиде начинает циркулировать постоянный ток  $I$ . Однако постоянный ток, протекающий в данной цепи, не сразу достигнет предельного значения  $\left( I = \frac{\mathcal{E}_0}{R_n} \right)$ , а будет нарастать постепенно.

Явления, происходящие при этом в контуре можно описать следующим дифференциальным уравнением:

$$\varepsilon_0 = L \frac{di}{dt} + R_n i(t), \quad (1)$$

где  $L \frac{di}{dt}$  – ЭДС индукции, возникающая при подключении источника тока.

Решение уравнения (1) имеет следующий вид:

$$i(t) = \frac{\varepsilon_0}{R_n} \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right), \quad (2)$$

где постоянная  $\tau = L / R_n$  – время установления тока.

Таким образом, переходный процесс будет продолжаться на интервале времени  $0 < t \leq \tau$ , определяемом значениями индуктивности и активного сопротивления нагрузки. При  $i(\tau) \approx I$  ток в контуре достигнет предельного значения. После окончания переходного процесса в данном контуре будет протекать постоянный ток  $I$ , который при неизменном объеме  $V$  не будет вызывать электромагнитные излучения. Поэтому на интервале времени  $\tau < t \leq t_{c1}$  всю запасенную в объеме энергию содержит магнитное поле [2,3]:

$$W = \frac{1}{2} I \int_s \mu H ds = \frac{1}{2} I \Phi. \quad (3)$$

Учитывая, что ток  $I$  и объем внутренней области  $V$  – постоянные, выражение (3) можно записать на временном интервале  $\tau < t \leq t_{c1}$  в более простом виде:

$$W = \frac{1}{2} L (I)^2 \lambda, \quad (4)$$

где  $\lambda$  – коэффициент сохранения потока.

При подрыве ВВ (см. рисунок 1) на поверхность внутренней оболочки, обладающей ограниченной прочностью, будет действовать сила  $F$ . Под действием этой силы внутренний контур сжимается, увеличивая напряженность магнитного поля, что приводит к увеличению тока в катушке, до величины  $I_{c2}$ . Процесс взрывного воздействия на данную структуру будет лежать во временном интервале  $t_{c1} < t \leq t_{c2}$ . Диапазон изменения тока в данном контуре при подрыве ВВ, можно определить, используя следующее выражение [3]:

$$\frac{I_{c2}}{I} = \alpha \lambda, \quad (5)$$

где  $I$  – ток в данном контуре до подрыва ВВ,  $I_{c2}$  – ток в контуре на момент времени  $t = t_{c2}$ , который соответствует максимальному сжатию внутренней оболочки без ее разрыва, под действием взрывчатого вещества. Коэффициент перестройки контура  $\alpha$ , с учетом, что индуктивность на интервале времени  $t_{c1} < t \leq t_{c2}$  изменяется от первоначальной величины  $L$  до значения  $L(t_{c2}) = L_{c2}$ , запишем следующим образом:

$$\alpha = \frac{L_{c2}}{L} \quad (6)$$

или, учитывая выбранную структуру

$$\alpha = \frac{R_{c2}}{R_o}, \quad (7)$$

где  $R_o$  – внутренний радиус цилиндрического лайнера до детонации ВВ;  $R_{c2}$  – минимальный внутренний радиус лайнера, предшествующий его разрыву под воздействием ВВ.

Таким образом, для максимального значения тока, с учетом выбранной структуры, можно записать следующее выражение:

$$i(t_{c2}) = I_{c2} = I\lambda \frac{R_o}{R_{c2}}. \quad (8)$$

Закон изменения внутреннего радиуса цилиндрического лайнера под воздействием продуктов детонации ВВ, можно записать следующим образом [3]:

$$R_2(t) = R_o \sqrt{1 - \frac{1}{8} \frac{m}{M} \left( \frac{Dt}{R_o} \right)^2}, \quad (9)$$

где  $m$  – масса ВВ,  $M$  – масса лайнера,  $D$  – скорость сжатия лайнера.

Временная зависимость изменения внутреннего радиуса лайнера при подрыве ВВ представлена на рисунке 2. Данная зависимость построена для стального лайнера с начальным внутренним радиусом равным 6 см. Штриховыми линиями показаны значения внутреннего радиуса лайнера и времени начала образования нестабильностей, экспериментально полученные в работах [3, 4].

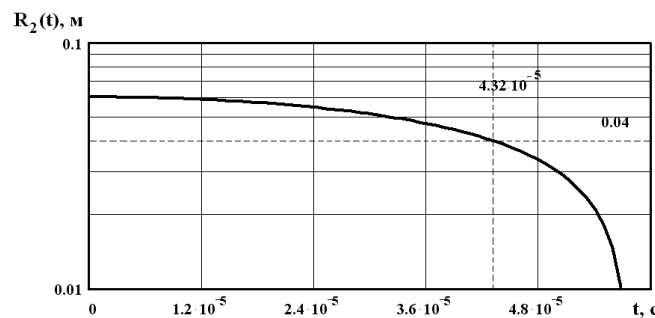


Рисунок 2 – Временная зависимость изменения внутреннего радиуса лайнера под воздействием продуктов детонации ВВ

Основываясь на (9), запишем закон изменения тока, при сжатии цилиндрического лайнера под воздействием подрыва ВВ:

$$i(t) = \frac{I\lambda}{\sqrt{1 - \frac{1}{8} \frac{m}{M} \left( \frac{Dt}{R_o} \right)^2}}. \quad (10)$$

Энергию на данном промежутке времени  $t_{c1} < t \leq t_{c2}$ , можно определить следующим образом:

$$W = \int_{t_{c1}}^{t_{c2}} \left[ \frac{I\lambda}{\sqrt{1 - \frac{1}{8} \frac{m}{M} \left( \frac{Dt}{R_o} \right)^2}} \right]^2 \frac{1}{R_H} dt \quad (11)$$

или

$$W = \frac{I^2 \lambda^2}{\frac{R_H D}{2R_o} \sqrt{\frac{m}{M}}} \ln \left( \frac{\left( \frac{D}{4R_o} \sqrt{\frac{m}{M}} (t_{c2} - t_{c1}) + \left( 1 - \frac{1}{8} \frac{m t_{c2} t_{c1}}{M} \left( \frac{D}{R_o} \right)^2 \right) \right)}{\left( \frac{D}{4R_o} \sqrt{\frac{m}{M}} (t_{c1} - t_{c2}) + \left( 1 - \frac{1}{8} \frac{m t_{c2} t_{c1}}{M} \left( \frac{D}{R_o} \right)^2 \right) \right)} \right). \quad (12)$$

На рисунку 3 представлена графічеська залежність змінення енергії, передаваної на нагрукку от значень времени  $t_{c2}$ . Данная залежність построена с учетом, что на интервале времени  $\tau < t \leq t_{c1}$  в выбранной структуре закончился переходный процесс и накоплена первоначальная энергия. Максимальные значения энергии на нагрукке возможны при длительности интервала  $t_{c1} < t \leq t_{c2}$  более  $30 \cdot 10^{-6}$  с, что определяется механическими свойствами металлического лайнера.

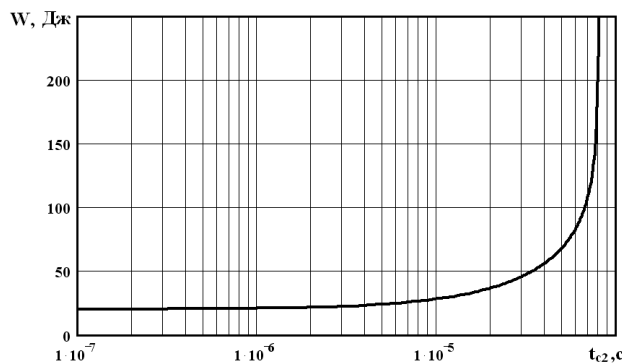


Рисунок 3 – Залежність значень енергії, передаваної на нагрукку при сжатии лайнера от времени начала образования нестабильностей на внутренней поверхности

Анализ результатов исследований, проведенных в работах [1–4], показал, что при деформации лайнера представляет интерес только та стадия сжатия, на которой не образуются нестабильности и внутренняя поверхность остается цилиндрической формы. Данные нестабильности образуются и развиваются из-за разницы в плотности сжимаемого металлического лайнера и среды (воздуха), где происходит деформация. При образовании и развитии нестабильностей внутренняя поверхность из цилиндрической переходит в звездообразную, что нередко сопровождается появлением разрывов (см. рисунок 4 [3, 4]).

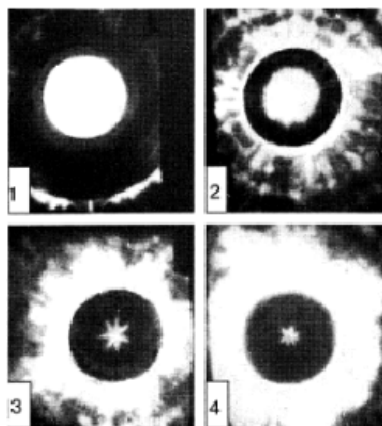


Рисунок 4 – Процесс образования нестабильностей в цилиндрическом лайнере (интервал между снимками  $1,6 \cdot 10^{-6}$  с)

В работе [4], показано, что максимальное сжатие металлического лайнера без образования нестабильностей возможно лишь до диаметра в 1,5 меньшего первоначального значения (см. таблицу 1).

Таблица 1 – Экспериментальные данные возможного сжатия металлического лайнера, без образования неустойчивостей

Начальный внутренний диаметр лайнера, мм	Диаметр сжатого лайнера, без образования неустойчивостей, мм	Коэффициент сохранения потока
33	20	0,86
45	30	0,91

Анализируя выше изложенное, необходимо заметить, что выражения (8)-(11) будут верны только до момента образования неустойчивостей на внутренней поверхности лайнера, т.е.

$$t_{c1} < t \leq t_{c2} \text{ при } t_{c2} < t_{нест}, \quad (13)$$

где  $t_{нест}$  – время образования неустойчивостей при сжатии цилиндрического лайнера.

Длительность импульса, который формируется данным генератором, будет зависеть от скорости сжатия цилиндрического лайнера на интервале времени  $t_{c1} < t \leq t_{c2}$ .

**Выводы.** Таким образом, максимальные значения энергии на нагрузке возможны для длительностей импульса более  $30 \cdot 10^{-6}$  с. Однако, анализ результатов исследований, проведенных в работах [3–5], показал, что использование отдельных как геофизических, так и радиотехнических методов возможно лишь при длительностях импульсного воздействия на несколько порядков меньших чем для максимального значения энергии на нагрузке импульсного ВМГ. Для увеличения энергии передаваемую на высокоимпедансную нагрузку необходимо использовать комбинированную конструкцию ВМГ, сочетающую в себе как элементы импульсного, так и спирального ВМГ.

#### Литература

1. Сахаров А.Д. Взрывомангнитные генераторы / А.Д. Сахаров // Успехи физ. наук. – 1966. – Т. 88. Вып. 4. – С. 725–734.
2. Демидов В.А. Высокоиндуктивные взрывомангнитные генераторы с большим коэффициентом усиления энергии / В.А. Демидов, Е.И. Жариков, С.А. Казаков // ПНТФ. – 1981. №6. – С. 106–110.
3. Асиновский Э.И. Взрывные генераторы мощных импульсов электрического тока/ Э.И. Асиновский [ и др.]; под ред. Фортова В.Е. – М.: Наука, 2002. – 399 с.
4. Прищепенко А.Б. Взрывы и волны. Взрывные источники электромагнитного излучения радиочастотного диапазона / А.Б. Прищепенко. – М.: БИНОМ, 2008. – 208 с.
5. Кравченко В.И. Электромагнитное оружие / В.И. Кравченко. – Харьков: из-во НТУ «ХПИ». – 2008. – 185 с.

#### Bibliography (transliterated)

1. Saharov A.D. Vzryvomagnitnye generatory A.D. Saharov Uspehi fiz. nauk. – 1966. – Т. 88. Vyp. 4. – p. 725–734.
2. Demidov V.A. Vysokoinduktivnye vzryvomagnitnye generatory s bol'shim kojefficientom usilenija jenerгии V.A. Demidov, E.I. Zharikov, S.A. Kazakov PNTF. – 1981. #6. – p. 106–110.
3. Asinovskij Je.I. Vzryvnye generatory moshhnyh impul'sov jelektricheskogo toka Je.I. Asi-novskij [ i dr.]; pod red. Fortova V.E. – М.: Nauka, 2002. – 399 p.
4. Prishhepenko A.B. Vzryvy i volny. Vzryvnye istochniki jelektromagnitnogo izluchenija radiochastotnogo diapazona A.B. Prishhepenko. – М.: BINOM, 2008. – 208 p.
5. Kravchenko V.I. Jelektromagnitnoe oruzhie V.I. Kravchenko. – Har'kov: iz-vo NTU «HPI». –2008. – 185 p.

УДК 621.373.7

Тараненко С.В.

#### **ПЕРЕТВОРЕННЯ ЕНЕРГІЇ В ІМПУЛЬСНОМУ ВИБУХОМАГНІТНОМУ ГЕНЕРАТОРІ**

В роботі представлені результати досліджень перетворення енергії в замкнутому контурі імпульсного вибухомагнітного генератора, шляхом виштовхування магнітного поля з об'єма лайнера, з вибуховою речовиною.

Taranenko S.V.

**THE ENERGY PERFORMANCE IN PULSE MAGNETIC EXPLOSIVE TYPE GENERATOR**

The results of researches related to energy performance in closed circuit of magnetic explosive type generator are presented. The researches were carried out for case of magnetic... pushing out from inside space of ship containing explosive subsistence.



Кучер Д.Б., Харланов А.И., Зонтова Т.В.

### О НЕКОТОРЫХ ОСОБЕННОСТЯХ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МАГНИТНОЙ ЖИДКОСТИ В ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ АНТЕННАХ

Мировой океан с незапамятных времен привлекал к себе внимание человечества, но до самого последнего времени доступным для всестороннего исследования являлся лишь его тонкий приповерхностный слой. Отдельные успешные попытки проникновения человека в океанские глубины, даже такие, как рекордное погружение Пикара на предельную глубину, практически не меняли дела. По мнению специалистов, и сегодня человек знает об океанском дне меньше, чем о поверхности Луны и Марса [1].

**Актуальность и постановка проблемы.** Научно-техническая революция (НТР) вызвала коренные изменения в подходе к решению проблемы океана. С участием гидроакустической техники и ростом областей ее применения расширяется круг не только специалистов, занимающихся непосредственно разработкой и эксплуатацией этой техники, но и ученых, инженеров, использующих гидроакустическую аппаратуру в смежных областях. С одной стороны, НТР потребовала более быстрого и многопланового освоения океанских глубин, с другой – создала реальную предпосылку к созданию разнообразных и эффективных технических средств, приборов и устройств, расширяющих возможности проникновения в океанские глубины и их изучение. В свою очередь это дало возможность ставить перед исследователями и инженерами новые практические задачи, решение которых позволит получить большой экономический эффект. Эта диалектическая взаимосвязь обеспечила невиданный рост темпов океанографических и других исследований океанов и морей, добычи скрытых в морских глубинах пищевых и сырьевых ресурсов [2]. Однако специфика морской среды делает прием и передачу сигналов какой-либо физической природы делом далеко не простым. Например, все средства, пригодные для получения и передачи информации в условиях земли и космоса (радиоизлучения, лазеры, оптика и др.) практически непригодны под водой. Поэтому, гидроакустическая техника на сегодняшний день является основной для получения информации в морской среде.

Гидроакустические средства наблюдения позволяют вести поиск практически любых подводных объектов, независимо от природы и размеров, находящихся в толще воды или на дне, в пределах любых океанских глубин. С их помощью можно обнаружить и затонувшее судно, и скопление планктона, китов и креветок, подводные скалы и проложенный по дну кабель. Обнаруженные объекты можно классифицировать, т.е. определять их природу и принадлежность, и осуществлять за ними длительное слежение. В настоящее время для решения вышеперечисленных задач используются традиционные типы гидролокаторов, а именно: электромагнитные, электродинамические, магнитострикционные, пьезоэлектрические, пневматические, гидравлические [1,2]. Однако с ростом требований, предъявляемых к ним, данные гидролокаторы перестали удовлетворять по своим характеристикам: либо по мощности излучения, либо по массо-габаритам ну и, наконец, по энергозатратам. Постоянно существуют две тенденции, первая – увеличение дальности обнаружения подводных объектов, что возможно увеличив излучающую мощность [3–4]:

$$W = \frac{1}{2} \int_S \rho \omega^* dS \quad (1)$$

и повысив чувствительность приемников [4,5]:

$$S = \left| \frac{U(\Theta_0, \varphi_0)}{\rho(\Theta_0, \varphi_0)} \right|. \quad (2)$$

Вторая тенденция – повышение точности обнаружения подводных объектов, что возможно осуществить увеличением частоты излучения, а это неизбежно приведет к потере дальности обнаружения. Однако в совокупности это требует поиска новых методов и методик излучения, приема и преобразования гидроакустических сигналов на новых физических принципах.

**Цель.** В работах [4–6] уже рассмотрено достаточное количество свойств и характеристик различных магнитных жидкостей, на основании которых возможно предположить создание нового типа преобразования акустических волн в электрические. Поэтому, в данной работе представлены результаты

исследований направленные на изучение процессов преобразования колебаний акустического и ультразвукового диапазона, происходящих в магнитной жидкости, подверженной воздействию периодически изменяющегося магнитного поля. Понимание данных процессов позволит в будущем сформулировать рекомендации по созданию современных гидролокаторов с учетом возрастающих требований к ним. Этим и обусловлена актуальность и целесообразность исследований.

Магнитные жидкости (МЖ), синтезированные в середине 20-го века на стыке наук коллоидной химии, физики магнитных явлений и гидродинамики, относятся к магнитоуправляемым материалам и получили широкое практическое применение в машиностроении, медицине, других областях промышленности. Магнитные жидкости обладают уникальными магнитными свойствами: хорошей текучестью и намагниченностью. Важной особенностью ферромагнитных коллоидов, в отличие от большинства известных магнитных систем, является свобода поступательного движения магнитных частиц, которая может быть причиной структурных превращений, связанных с одновременным изменением характера магнитного упорядочения и пространственного расположения частиц в слое жидкости. Наблюдаемые в магнитной жидкости магнитомеханические, магнитооптические и электрофизические явления во многом определяются свойствами малых частиц, их взаимодействием во внешних полях и структурным состоянием системы. Связь макроскопических свойств вещества с его микроскопическими характеристиками является одним из основных вопросов физики жидких дисперсных систем.

Относительно процессов, определяющих электрические свойства магнитных жидкостей на сегодняшний день нет единого мнения; [5,6] основой МЖ, как правило, являются полярные или неполярные диэлектрики с проводимостью порядка  $10^{-10} - 10^{-14}$  См/м, поверхностно-активное вещество, выбираемое в качестве стабилизатора, имеет проводимость порядка  $10^{-10}$  См/м. Частицы магнетита, хоть и имеют проводимость порядка  $2 \cdot 10^4$  См/м, однако окружены плотным слоем олеиновой кислоты, поэтому проводимость магнитной жидкости не обусловлена проводимостью частиц магнетита. Проводимость же самой магнитной жидкости имеет значения порядка  $10^{-6} - 10^{-7}$  См/м, что соответствует электрическим свойствам разбавленных электролитов. Считается, что носителями заряда в МЖ являются ионы примесей – результат химической конденсации при соосаждении солей двух- и трех валентного железа из водного раствора действием водного раствора аммиака.

Неоднородное магнитное поле способно привести магнитную жидкость в движение, причем периодически изменяющееся во времени поле возбуждает периодические движения, то есть колебания. Наличие многочисленных типов собственных колебаний объемов магнитных жидкостей и возможность создания вынужденных колебаний создает предпосылки для реализации целого ряда резонансных явлений.

Физические предпосылки возбуждения вынужденных волн на поверхности магнитной жидкости заключаются в том, что давление в любой точке жидкости пропорционально напряженности магнитного поля в ней [4,5]. Это означает, что свободная поверхность жидкости как поверхность постоянного давления, находящаяся в периодическом магнитном поле, будет волнистой, представляя собой систему впадин и возвышений, соответствующих минимумам и максимумам магнитного поля. Соответственно, бегущее магнитное поле генерирует бегущую поверхностную волну. При совпадении характеристик возбуждаемой магнитным полем поверхностной волны с характеристикой собственных волн создаются наиболее благоприятные условия для передачи энергии от магнитного поля к входящей волне (эхо-сигнал), и соответственно, ее возбуждение будет носить резонансный характер. Условием наступления резонанса является такая связь между частотой и периодом вынуждающей силы, которая соответствует связи между этими величинами для свободных поверхностных волн. В этом и заключается принципиальное отличие от иных колебательных систем, при котором существует только одна колебательная характеристика силы – частота. В рассредоточенных системах резонанс достигается в результате соответствия свободным колебаниям как временных, так и пространственных характеристик силы.

Для слоя жидкости толщиной  $l$ , ограниченного у основания твердой поверхностью, а с обратной стороны – бесконечным массивом немагнитной жидкости, условие резонанса в пренебрежении возмущениями поля имеет вид [5,6]:

$$\omega^2 = \frac{(\rho_1 - \rho_2)kg + \alpha k^3}{\rho_1 + \rho_2} \text{th}kl, \quad (3)$$

где  $\rho_1$  – плотность МЖ;  $\rho_2$  – плотность воды;  $k$  – резонансное волновое число;  $g$  – ускорение свободного падения;  $\alpha = 3,2 \cdot 10^{-3}$  Н/м.

При теоретическом рассмотрении колебательных инверсных электромеханических преобразований возникает необходимость учета ограниченности колебаний амплитуды в резонансе. На практике это связано с ограничением уровня деформации чувствительных мембран гидрофонов. Для этого необходимо учитывать вязкость магнитной жидкости, коэффициент которой определяется [5,6]:

$$\zeta \approx \mu_0 M H_a / (4\eta k \omega), \quad (4)$$

где  $H_a$  – амплитуда переменного магнитного поля,  $k$  и  $\omega$  – резонансное волновое число и частота,  $\eta$  – наибольшая динамическая вязкость жидкостей.

**Выводы.** Таким образом, использование резонансных свойств магнитной жидкости для повышения чувствительности приемных антенн гидроакустических комплексов позволит решать человечеству самые сложные задачи под водой.

В настоящее время невозможно назвать область человеческой деятельности, связанную с проникновением в океанские глубины, в которой не применялась бы гидроакустика. Можно с полной определенностью утверждать, что многие исследования и работы в океанах и морях были бы значительно менее эффективными, а некоторые и невозможными без применения гидроакустических средств. Именно эти средства помогают человеку познать многие тайны и загадки природы, скрытые в многокилометровой толще морской воды, открывают путь в таинственные и враждебные глубины гидрокосмоса, обеспечивают получение человеком несметных богатств, хранящихся в воде и недрах морского дна. В этом смысле гидроакустика и оказалась электронным лучом, открывшим в прямом и переносном смысле пути в океанские глубины.

#### Литература

1. Клюкин И.И. Судовая акустика: Учебное пособие / И.И. Клюкин, А.А. Клещев. — Л.: Судостроение, 1982. – 144 с.
2. Митько В.Б., Евтюттов А.П., Гушин С.Е. Гидроакустические средства связи и наблюдения. / В.Б. Митько, А.П. Евтюттов, С.Е. Гушин – Л.: Судостроение, 1982. – 200 с.
3. Ландау Л.Д. Электродинамика сплошных сред / Л.Д.Ландау, Е.М.Лившиц. – М.: Физматгиз, 1959 – 532 с.
4. Берковский Б.М. Магнитные жидкости / Б.М.Берковский, В.Ф.Медведев, М.С.Краков. – М.: Химия, 1989. – 240 с.
5. Блум Э.Я. Магнитные жидкости / Э.Я.Блум, А.О.Цеберс. – М.: Знание, 1989. – 240 с.
6. Шлиомис М.И. Магнитные жидкости / М.И. Шлиомис // Успехи физ. наук. – 1974. – Т. 112. Вып. 3. – С. 427–458.

#### Bibliography (transliterated)

1. Kljukin I.I. Sudovaja akustika: Uchebnoe posobie I.I. Kljukin, A.A. Kleshhev. — L.: Sudostroenie, 1982. – 144 p.
2. Mit'ko V.B., Evtjutov A.P., Gushhin S.E. Gidroakusticheskie sredstva svyazi i nabljudenija. V.B. Mit'ko, A.P. Evtjutov, S.E. Gushhin – L.: Sudostroenie, 1982. – 200 p.
3. Landau L.D. Jelektrodinamika sploshnyh sred L.D.Landau, E.M.Livshic. – M.: Fizmatgiz, 1959 – 532 p.
4. Berkovskij B.M. Magnitnye zhidkosti B.M.Berkovskij, V.F.Medvedev, M.S.Krakov. – M.: Himija, 1989. – 240 p.
5. Blum Je.Ja. Magnitnye zhidkosti Je.Ja.Blum, A.O.Cebers. – M.: Znanie, 1989. – 240 p.
6. Shliomis M.I. Magnitnye zhidkosti M.I. Shliomis Uspehi fiz. nauk. – 1974. – T. 112. Vyp. 3. – p. 427–458.

УДК 621.396.677

Кучер Д.Б., Харланов О.І., Зонтова Т.В.

#### О ДЕЯКИХ ОСОБЛИВОСТЯХ ВИКОРИСТАННЯ МАГНІТНОЇ РІДИНИ В ГІДРОАКУСТИЧНИХ АНТЕНАХ

В роботі проведено аналіз деяких процесів, що відбуваються в магнітній рідині під зовнішнім впливом. Запропоновано використання резонансних явищ магнітної рідини для обробки та перетворення сигналів в антенах гідроакустичних станцій з метою підвищення їх чутливості.

Kucher D.B., Kharlanov O.I., Zontova T.V.

**SOME FEATURES OF MAGNETIC LIQUID USE IN HYDROACUSTIC ANTENNAS**

The analysis of some processes in magnetic liquid under external disturbances was done. The use of resonance of magnetic liquid is proposed for treatment and performance of signals in antennas of hydroacoustic units to increase the level of sensibility.

Веретенников А.И., Глебов В.В., Грунев С.Г., Жадан В.А., Мормило Я.М., Радченко И.Г.

### **О ПЕРСПЕКТИВНОЙ ПНЕВМОГИДРАВЛИЧЕСКОЙ ПОДВЕСКЕ ДЛЯ КОЛЕСНЫХ МАШИН**

**Постановка проблемы.** Уровень подвижности является важным показателем современных колесных машин специального назначения. Он определяется не только мощностью двигателя и конструкцией трансмиссии, но и характеристиками плавности хода, которые обеспечиваются системой поддресоривания (СП).

Кроме повышения средних скоростей движения, характеристики плавности хода оказывают влияние на параметры стабилизации вооружения и как следствие – на точность стрельбы с ходу. В связи с этим, решение вопросов связанных с совершенствованием конструкции СП, повышение ее технических характеристик является весьма актуальной задачей.

**Анализ современных исследований.** В настоящее время в конструкциях большинства СП современных колесных машин специального назначения (бронетранспортеры, броневые автомобили) применяются металлические упругие элементы (листовые, спиральные, стержневые рессоры) с гидравлическими амортизаторами [1, 2]. Характеристики таких конструкций в целом удовлетворительные, однако постоянное повышение требований к подвижности и плавности хода колесных машин заставляет искать другие варианты, которые бы позволили снять ограничения по скорости движения на всех типах трасс с высотой неровности до 140–150 мм. А для колесных машин, применяемых совместно с гусеничными, такими как танк, данный показатель должен быть равным высоте проходной неровности танка, которая для перспективных машин должна быть не менее 190 мм [3]. Кроме того, высота проходной неровности находится в прямой зависимости от величины динамического хода [4], и его увеличение на колесных машинах с металлическим упругим элементом затруднительно из-за необходимости соблюдения приемлемой кинематики рулевого управления. Применение пневмогидравлических подвесок позволило поднять характеристики плавности хода на качественно новый уровень, однако не решило всех проблем [5]. Специалистами Института технической механики Национальной Академии Наук Украины и Национального Космического Агентства Украины (ИТМ НАНУ и НККАУ) предложен новый тип упругого элемента – автономный пневмогидравлический с квазинулевой жесткостью на основном рабочем участке характеристики и автоматическим поддержанием дорожного просвета в независимости от степени загруженности транспортного средства [6].

**Целью статьи** является проведение сравнительного анализа результатов испытаний элементов СП – пневмогидравлической подвески (ПГП) нового типа и выработка рекомендаций по внедрению данного типа упругого элемента в конструкцию СП существующих и перспективных колесных машин специального назначения.

**Основная часть.** При разработке элементов ПГП были заданы следующие требования к их конструкции:

- снижение амплитуды колебаний поддресоренной массы ( $\approx$  на 40 %);
- автономность (отсутствие соединительных каналов между элементами);
- минимальный объем проводимого технического обслуживания (ТО);
- отсутствие в конструкции узлов и деталей из дорогих материалов;
- низкая себестоимость при серийном производстве;
- возможность установки элементов одного типоразмера на различные типы колесных машин с минимальным объемом доработок штатных сопрягаемых узлов и деталей;
- обеспечение надежной управляемости транспортным средством на всех скоростях движения (отсутствие отрыва колес);
- возможность регулирования и изменения характеристик элементов ПГП;
- возможность внедрения элементов данного типа в конструкцию СП машин с полной массой от 5-ти до 20-ти тонн, как военного, так и гражданского назначения.

В результате работы были определены упругие характеристики элементов ПГП (рис. 1) и разработаны схемы установки их на изделие (рис. 2).

Как видно из графика (рис. 1) отличительной особенностью упругой характеристики является наличие участка так называемой квазинулевой жесткости вокруг статического положения машины, когда при значительном увеличении хода подвески, нагрузка на колесе меняется незначительно, что не создает дополнительных динамических нагрузок при наезде на препятствие или при попадании в яму и как следствие улучшает плавность хода.

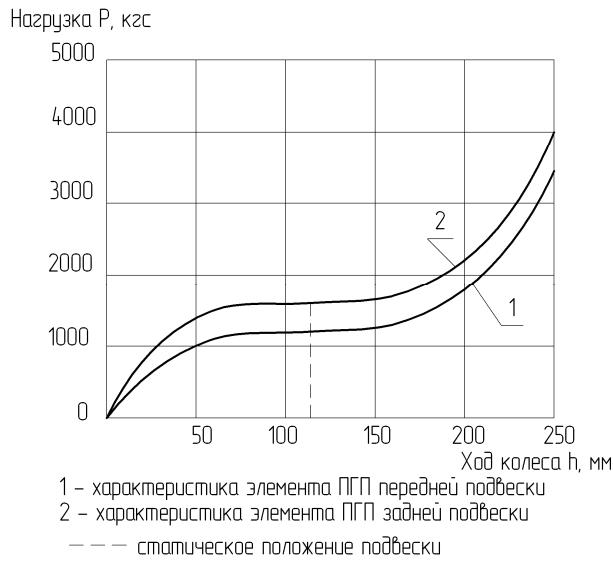
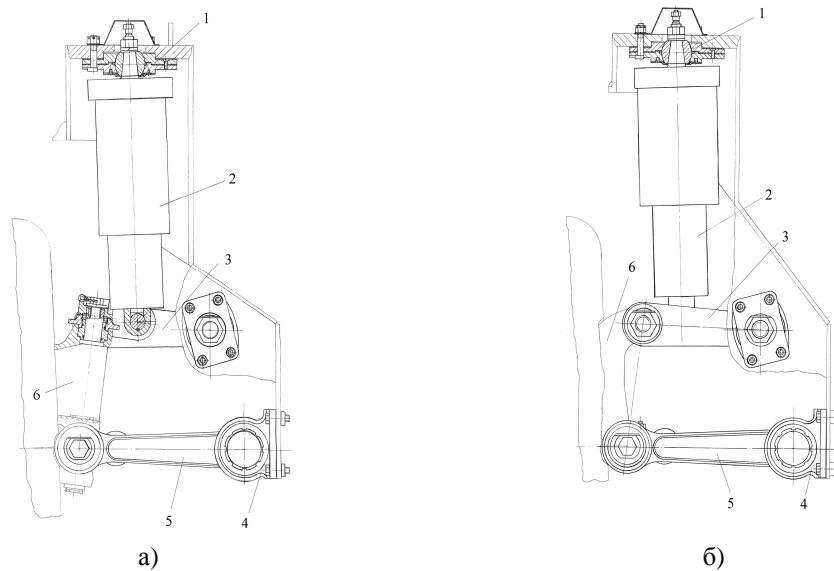


Рисунок 1 – Упругие характеристики элементов ПГП



а) – установка элемента ПГП в подвеску управляемых колес;  
б) – установка элемента ПГП в подвеску неуправляемых колес;  
1 – опора верхняя, 2 – элемент ПГП, 3 – рычаг верхний, 4 – кронштейн рычага нижнего,  
5 – рычаг нижний, 6 – редуктор колесный

Рисунок 2 – Схемы установки элементов ПГП на изделие

Установка элементов ПГП была произведена на колесный бронетранспортер 4×4 «Дозор-Б» путем замены штатной СП (торсионные валы и гидроамортизаторы), для чего потребовался минимальный объем доработок штатных и изготовления оригинальных деталей крепления.

Сравнительные испытания изделия укомплектованного штатной СП и элементами ПГП, проводились на дороге с твердым покрытием (асфальт) с установленными искусственными неровностями высотой 140 мм. В качестве оценочного показателя была принята величина вертикальных ускорений в зависимости от скорости движения в сравнении с допускаемыми – 3g [7]. Ускорения регистрировались на месте механика-водителя и на месте десантника (пассажира) у кормовой двери. На рис. 3 и 4 приведены сравнительные характеристики параметров плавности хода изд. «Дозор-Б» различной массы, имеющего штатную СП и с установленными элементами ПГП.

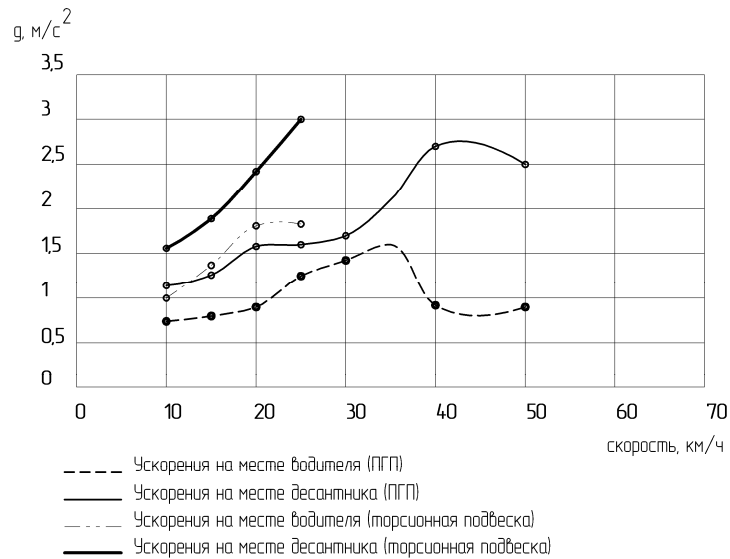


Рисунок 3 – Залежність прискорень від швидкості при русі вантажу «Дозор-Б» масою 5,7 т, укомплектованного різними типами підвіски по нерівностям висотою 140 мм, довжиною 4,4 м і кроком 4,65 м (1,5 бази)

Графіки (рис. 3 і рис. 4) показують, що для вантажу «Дозор-Б» з встановленими елементами ПГП, рівень вертикальних прискорень не перевищує допустимих значень (3g) у всьому діапазоні швидкостей русу і при різних варіантах завантаження вантажу. В той же час у вантажу, обладнаного торсіонною підвіскою, вже при швидкостях 25 км/ч спостерігалося перевищення допустимого рівня вертикальних прискорень на місці десантника. При цьому спостерігалося видиме значуще відірвання колес від опорної поверхні. У вантажу з елементами ПГП відірвання колес не спостерігалося. Далішні випробування були призупинені відповідно до вимог безпеки.

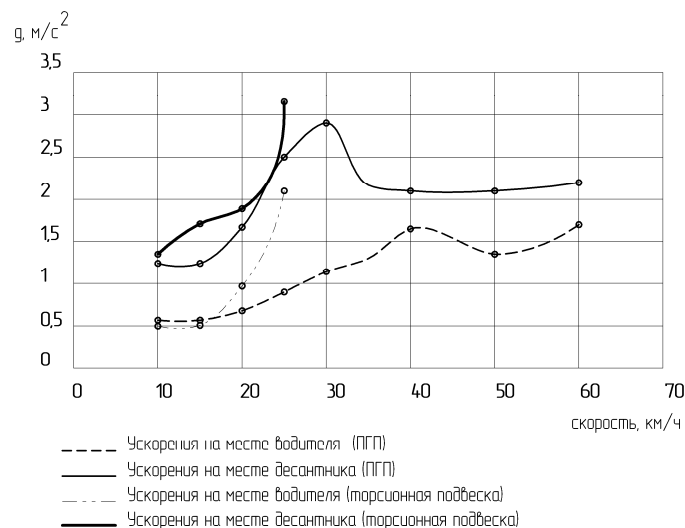


Рисунок 4 – Залежність прискорень від швидкості при русі вантажу «Дозор-Б» масою 6,1 т, укомплектованного різними типами підвіски по нерівностям висотою 140 мм, довжиною 4,4 м і кроком 4,65 м (1,5 бази)

**Висновки.** 1. Застосування на колісній машині 4×4 СП з елементами ПГП дозволяє суттєво покращити показники плавності ходу і управляємості в порівнянні зі штатним варіантом (торсіонна підвіска) і забезпечити висоту проходної нерівності до 140 мм без збільшення динамічних ходів СП.

2. Установка элементов ППП в СП колесных машин взамен торсионных валов и амортизаторов не требует значительных доработок штатных деталей (полностью сохраняются сопрягаемые детали рулевого управления и трансмиссии) и изготовления большого количества новых.

3. Учитывая положительные результаты испытаний, целесообразным является продолжение работ по совершенствованию конструкции элементов ППП для проведения сравнительных испытаний на плавность хода и возможного их применения для колесной машины 8×8.

#### Литература

1. Бах В.И., Вараксин Ю.Н., Выгодский С.Ю. Зарубежная бронетанковая техника: Справочник в двух книгах. – М.: Машиностроение, 1984.
2. Вараксин Ю.Н., Бах И.В., Выгодский С.Ю. Бронетанковая техника СССР (1920–1974). – М.: ЦНИИ информации, 1981.
3. Жадан В.А., Кононенко В.А., Кудров В.М., Мушинский Ю.М. О совершенствовании системы поддресоривания, направленном на повышение подвижности танка. // Механіка та машинобудування-№2. – 2004. С. 148–153.
4. Жадан В.А., Подольский В.П., Радченко И.Г. О модернизации систем поддресоривания военных гусеничных машин. // Механіка та машинобудування – №1. – 2006. С. 135–139.
5. Pengeley R, Pandur II in profile: Streyr's 8×8 digitized warfare platform is gathering Speed. Jane's International Defens Review. Febr. 2007, pp. 54–58.
6. Пилипенко М.В. Определение основных свойств пневматической подвески // Техническая механика – Дн-ск: Институт технической механики НАН Украины и НКА Украины, 2006. – №1. – С. 171–185.
7. Руководство по эргономическому обеспечению РЭО-СВ-80. Тема 4989. 1980 г.

#### Bibliography (transliterated)

1. Bah V.I., Varaksin Ju.N., Vygodskij S.Ju. Zarubezhnaja bronetankovaja tehnika: Spravochnik v dvuh knigah. – M.: Mashinostroenie, 1984.
2. Varaksin Ju.N., Bah I.V., Vygodskij S.Ju. Bronetankovaja tehnika SSSR (1920–1974). – M.: CNII informacii, 1981.
3. Zhadan V.A., Kononenko V.A., Kudrov V.M., Mushhinskij Ju.M. O sovershenstvovanii sistemy podressorivaniya, napravlennom na povyshenie podvizhnosti tanka. Mehanika ta mashinobuduvannja-#2. – 2004. p. 148–153.
4. Zhadan V.A., Podol'skij V.P., Radchenko I.G. O modernizacii sistem podressorivaniya voen-nyh gusenichnyh mashin. Mehanika ta mashinobuduvannja – #1. – 2006. p. 135–139.
5. Pengeley R, Pandur II in profile: Streyr's 8×8 digitized warfare platform is gathering Speed. Jane's International Defens Review. Febr. 2007, pp. 54–58.
6. Pilipenko M.V. Opredelenie osnovnyh svojstv pnevmaticheskoy podveski Tehnicheskaja me-hanika – Dn-sk: Institut tehnichekoj mehaniki NAN Ukrainy i NKA Ukrainy, 2006. – #1. – p. 171–185.
7. Rukovodstvo po jergonomicheskomu obespecheniju RJeO-SV-80. Tema 4989. 1980 y.

УДК 623.438.324

Веретенников О.И., Глебов В.В., Груньов С.Г., Жадан В.А., Мормило Я.М., Радченко И.Г.

#### ПРО ПЕРСПЕКТИВНУ ПНЕВМОГІДРАВЛІЧНУ ПІДВІСКУ ДЛЯ КОЛІСНИХ МАШИН

Праця присвячена аналізу використання дослідних зразків елементів пневмогідролічної підвіски у системі підресорювання колісної машини та розробці рекомендацій щодо їхнього подальшого використання.

Veretennikov A.I., Glebov V.V., Gruniov S.G., Zhadan V.A., Mormylo Y.M., Radchenko I.G.

#### OF PERSPECTIVE PNEUMOHYDRAULIC SUSPENSION FOR WHEELING VEHICLES



The paper analyses the use of the prototypes of the pneumohydraulic suspension elements in the wheeled vehicle cushioning system and recommends their subsequent application

**СТЕНДОВЫЕ ИСПЫТАНИЯ ПОЛНОРАЗМЕРНЫХ ТЕПЛООБМЕННИКОВ ТАНКА БМ «ОПЛОТ»**

**Актуальность проблемы.** Рассматриваются вопросы отвода тепла в систему охлаждения и его утилизация эжекционной системой охлаждения. Оценочным показателем эффективности теплообменника является его способность сохранить тепловое равновесие в наиболее сложных режимах эксплуатации танка «Оплот» с двигателем мощностью 882 кВт (1200 л.с.), т.е. обеспечить температуру охлаждающей жидкости на уровне не более 130 °С при температуре окружающего воздуха 55°С при длительном движении на внешней характеристике двигателя в скоростном режиме.

Задача отвода тепла всегда сопряжена с целым рядом ограничений, главными из которых являются обеспечение требуемого расхода воздуха через теплообменники при ограниченном фронте самих теплообменников. Поэтому на первый план выходят проблемы создания такого теплообменника, который бы в условиях указанных ограничений мог бы обеспечить полный съем тепла на указанных критических режимах внешней характеристики двигателя. При правильном выборе охлаждающей поверхности водяных трубок и охлаждающих пластин такая задача решается практически на грани технических возможностей. Характеристика радиаторов зависит, в основном, от скорости воздуха и жидкого теплоносителя. Такая характеристика с достаточной степенью точности может быть определена только экспериментальным путем, что само по себе имеет определенные трудности, т.к. необходимо специальное стендовое оборудование.

При стендовых испытаниях теплообменников системы охлаждения использовались полноразмерные радиаторы танка БМ «Оплот» с полной имитацией режимов по воздуху и теплоносителю.

В танке расход воздуха через радиаторы обеспечивается эжектором, работающим на энергии выпускных газов. Для съема увеличенного количества тепла от двигателя в сравнении с танком Т-80УД была проведена оптимизация самого эжектора. Величина противодавления на выпуске ограничивается для любого двигателя на уровне не более 3 Па. Более высокие значения величины противодавления приводят к увеличению объектовых потерь мощности двигателя. Экспериментальные исследования по определению влияния величины противодавления на объектовые потери мощности показали, что на каждый 1 Па затрачивается 25...40 л.с. мощности двигателя. Суммарные потери мощности на выпуск отработавших газов складываются, в основном, из двух составляющих – скоростного напора газа на сопловом аппарате эжектора и потерь статического давления в самом газоходе.

Величина скоростного напора на сопловом аппарате является основной функциональной зависимостью, определяющей эффективность самого эжектора, т.е. возможностью создания циркуляции воздуха через пакет радиаторов в таких количествах, при которых могли бы быть обеспечены условия теплового равновесия.

В упрощенном виде характеристика эжектора для режима нестационарного потока газов может быть выражена следующей зависимостью:

$$\frac{\Delta P}{\bar{\eta}} = \frac{2}{\bar{m}} + \frac{1 + \xi_{ex}}{\bar{m}^2} \left( \frac{q}{\sqrt{\Delta}} \right)^2 - \frac{A}{\bar{m}^2} \left( 1 + \frac{q}{\sqrt{\Delta}} \right).$$

Величины  $(\bar{\eta})$  и  $(\bar{m})$  являются безразмерными обобщенными координатами, связывающими характеристики эжектора при работе на стационарном и пульсирующем потоке. Величина  $(m)$  является функцией степени напорности или расходности эжектора и определяется соотношением  $\left( \frac{F_{ks}}{F_c} \right)$ , т.е. отношением площади камеры смешения  $(F_{ks})$  к площади сопел соплового аппарата эжектора  $(F_c)$ .

Величина  $(q)$  является степенью повышения расхода воздуха через пакет радиаторов  $(G_2)$  по отношению к расходу газов через сопловой аппарат  $(G_1)$ , т.е.

$$q = \frac{G_2}{G_1}.$$

Величина  $(\sqrt{\Delta})$  – поправочный температурный коэффициент, определяющий величины искомой температуры для которой проводится расчет эжектора.

В более простом виде выбор основных геометрических характеристик эжектора, определяющихся параметром  $(A)$ , можно представить в виде элементарного уравнения эжектора, полагая, что режим истечения газа является стационарным:

$$\Delta P_{\max} = \frac{2}{m} - \frac{A}{m^2}.$$

Значение коэффициента качества эжектора  $(A)$ , характеризующее уровень энергии газового потока на выходе из диффузора, определяется по результатам макетирования и предварительных испытаний.

Максимальная производительность эжектора  $(Q_{\text{эж}})$  либо его напорность  $(\Delta P_{\max})$  в размерных координатах определяется для случая  $\Delta P = 0$ , в этом случае  $(q_{\text{эж}})$  равно максимальному значению.

Таким образом, выбор характеристики эжектора основывается на необходимости создания через фронт теплообменника скорости потока воздуха, способного отвести тепло, выделяемое двигателем на режимах скоростной либо нагрузочной характеристики при температуре окружающего воздуха до 55 °С.

Однако на производительность эжектора большое влияние оказывает и величина аэродинамического сопротивления самого теплообменника, которая определяется по результатам стендовых натурных испытаний.

Величина сопротивления определяется выбранной величиной расстояния между охлаждающими пластинами, их формой и наличием турбулизаторов. В меньшей мере на величину сопротивления оказывает форма расположения радиаторных трубок (шахматное либо коридорное), расстояние между ними и размеры самих трубок.

Создание определенной скорости потока воздуха влияет и на производительность эжектора. С увеличением аэродинамического сопротивления пакета радиаторов снижается производительность эжектора по следующей зависимости:

$$G_1 = G_0 G_{\text{ex}},$$

где  $G_{\text{ex}}$  – коэффициент сопротивления, равный  $\left(1 - \frac{G_{\text{ex}}}{10330}\right)$ .

Следовательно, производительность эжектора  $(G_1)$  будет уменьшаться с ростом аэродинамического сопротивления.

Величина теплоотдачи и величина аэродинамического сопротивления находится в тесной зависимости и выбор их значений, естественно, основывается как на характеристике эжектора, так и на необходимости обеспечения заданных условий отвода тепла.

Третья характеристика теплообменника представляет собой зависимость гидравлического сопротивления от скорости (расхода) охлаждающей жидкости через теплообменник

$$\Delta P_2 = f(G_g).$$

Гидравлическое сопротивление с одной стороны определяется формой и количеством трубок в самом теплообменнике, выбором оптимальной скорости течения теплоносителя с учетом максимальной интенсификации процесса теплообмена между теплоносителем и охлаждающими пластинами.

Схема стенда для определения характеристик теплообменников приведена на рисунке.

Краткая характеристика стенда:

- максимальный расход воздуха через радиаторы создается вентилятором и составляет до 10,0 кг/с;
- расход жидкого теплоносителя обеспечивается водяным насосом и составляет до 90,0 т/ч при сопротивлении сети до 34 Па;
- подогрев теплоносителя до температуры ~120...130°С осуществляется ТЭнами, общей мощностью до 120 кВт.



Измеряемые величины:

– расход воздуха через теплообменники осуществляется мерной диафрагмой, установленной в трубе диаметром 0.8м и длиной 16м;

– расход теплоносителя определяется мерной диафрагмой, установленной в мерном участке трассы с соблюдением условий выравнивания давления до и после диафрагмы.

Расчет расходов воздуха и теплоносителя выполняется по перепаду давлений до и после диафрагм по формулам:

$$G_в = K_1 \sqrt{\Delta P_в \rho_в} \quad \text{– для воздуха,}$$

$$G_{охл} = K_2 \sqrt{\Delta P_{охл} \rho_{охл}} \quad \text{– для жидкого теплоносителя,}$$

– коэффициенты  $K_1$  и  $K_2$  определяются в соответствии с Правилами измерений;

–  $\rho_в$  и  $\rho_{охл}$  – плотность воздуха и теплоносителя при соответствующих температурах в момент измерения.

Измерение температур теплоносителя на входе и выходе из теплообменника производилось термометрами сопротивления ТСМ градуировки 23 в комплекте частотно цифровыми частотомерами Ф206, с погрешностью  $\pm 0,3^\circ\text{C}$ .

Аэродинамическое сопротивление теплообменников измерялось датчиками давления с точностью до 0.01 Па.

В процессе испытаний изменялись основные параметры расходов воздуха и теплоносителя в диапазоне, соответствующем работе двигателя на режимах реальной эксплуатации танка и ограничивались режимом внешней скоростной характеристики.

Характеристики теплоотдачи теплообменников оценивались из уравнений теплового баланса по воздуху и теплоносителю. В случае, если расхождение между тепловым балансом не превышало  $\pm 5\%$ , осуществлялся переход на следующий режим.

Уравнение теплового баланса имеет вид:

$$Q = G_1 C_1 (t_1' - t_1'') = G_2 C_2 (t_2' - t_2''),$$

где  $G_1, C_1, t_1', t_1''$  – расходы, теплоемкость и температуры «горячего» теплоносителя;  $G_2, C_2, t_2', t_2''$  – расходы, теплоемкость и температуры «холодного» теплоносителя.

Полученная в стендовых условиях величина теплоотдачи теплообменников приводилась к расчетному температурному напору по формуле:

$$Q = Q^1 \frac{\Delta t}{t_1' - t_2'},$$

где  $Q$  – приведенная величина теплосъема;  $Q^1$  – величина теплосъема, полученная при стендовых испытаниях;  $\Delta t$  – расчетный температурный напор;  $t_1'$  и  $t_2'$  – температура теплоносителя на входе и выходе из теплообменника.

По результатам испытаний определялась характеристика аэродинамического сопротивления в зависимости от расхода воздуха через теплообменник  $\Delta P_{аэп} = f(G_в)$ .

При этом величина расхода воздуха изменялась в широком диапазоне, соответствующем объектовым режимам эксплуатации танка.

Для корректности сравнения величины сопротивления, последняя приводилась к стандартным условиям

$$P_с = 760 \text{ мм рт.ст. и } t_с = 20^\circ\text{C}.$$

Приведение измеренных величин сопротивлений осуществлялось по формуле:

$$\Delta P_{\text{аер}} = \Delta P'_{\text{аер}} \frac{P_{\text{б}}}{273 + t_{\text{окр}}} \cdot \frac{293}{760},$$

где  $\Delta P'_{\text{аер}}$  – измеренная величина сопротивления;  $P_{\text{б}}$ ,  $t_{\text{окр}}$  – давление и температура воздуха при испытаниях.

Гидравлическое сопротивление пакета теплообменников определялось как функция скорости движения теплоносителя в трубках в диапазоне рабочих характеристик танка и ограничивалась максимальной производительностью водяного насоса двигателя на уровне 40 т/ч. Гидравлическое сопротивление определяется на «горячем» теплоносителе, температура которого поддерживалась на уровне  $80^{\pm 2}$  °С.

По результатам испытаний проведена оценка конструктивных элементов теплообменников и возможность использования их в танке БМ «Оплот» с двигателем мощностью 882 кВт (1200 л.с.).

### **Выводы**

1. Созданная для танка БМ «Оплот» эжекционная система охлаждения с реальной характеристикой сети способна обеспечить расход воздуха на внешней скоростной характеристике двигателя – 7,5 кг/с. С учетом того, что фронт радиаторов системы охлаждения равен 1,12 м<sup>2</sup>, скорость воздуха, приведенная к единице площади ( $Y_j$ ), равна 6,8 кг/с /м<sup>2</sup>.

2. В этом режиме обеспечивается съем тепла с теплообменников на уровне  $270 \cdot 10^3$  ккал/ч, что соответствует теплоотдаче двигателя в охлаждающую жидкость для танка БМ «Оплот» и обеспечивает эксплуатацию танка при температуре окружающего воздуха 50...55°С.

### **Литература**

1. Анипко О.Б., Борисюк М.Д., Климов В.Ф. Техническая термодинамика и теплопередача в компактных теплообменниках транспортных машин, Харьков НТУ «ХПИ» 2006г.:244 с.

### **Bibliography (transliterated)**

1. Anipko O.B., Borisjuk M.D., Klimov V.F. Tehnicheskaja termodinamika i teploperedacha v kompaktnyh teploobmennikah transportnyh mashin, Har'kov NTU "HPI" 2006g.:244 p.

УДК 623.48.32.

Колбасов О.М.

### **СТЕНДОВІ ВИПРОБУВАННЯ ПОВНОРОЗМІРНИХ ТЕПЛОБМІННИКІВ ТАНКА БМ «ОПЛОТ»**

У статті приведені основні напрямки випробувань теплообмінників системи охолодження танка БМ «Оплот» на стенді «Велика аеродинамічна труба», які дозволяють випробування натурних зразків і оцінки їх аеродинамічних, гідравлічних та теплотехнічних характеристик.

Kolbasov O.M.

### **BENCH TESTS OF FULL SCALE HEAT EXCHANGERS FOR “OPLOT” MAIN BATTLE TANK**

The main approaches to bench tests in big wind tunnel of heat exchangers for cooling system of “Oplot” MB tank are presented. It let to test the industrially manufactured units and estimate their aerodynamic, hydraulic and thermal characteristics.

УДК 664.661.12.]. 021.3

Білонога Ю.Л., Максисько О.Р.

**ЗМІНА ГІДРОМЕХАНІЧНИХ І ТЕПЛОФІЗИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕПЛОНОСІЯ В ПРИГРАНИЧНОМУ ШАРІ ПІД ДІЄЮ ПОВЕРХНЕВО-АКТИВНИХ РЕЧОВИН (ПАР)**

**Актуальність та мета дослідження.** При вивченні процесів тепло-масообміну важливу роль відіграють різноманітні критерії [1]. Емпіричні критеріальні рівняння, що часто зустрічаються у науковій та довідниковій літературі, несуть на собі потужний експериментальний матеріал і описують багатокомпонентні та багатofакторні системи, які неможливо відобразити аналітично.

Відомо, що гідромеханічні характеристики потоку рідкофазного теплоносія є визначальними для проходження процесів теплообміну в системі стінка трубопроводу-теплоносій. Для ефективної роботи теплообмінної апаратури необхідно, щоб рух теплоносіїв здійснювався в турбулентному режимі. Однак, в пристінній області трубопроводу виникає приповерхневий ламінарний (Л) шар, де концентрується 98 % теплового опору системи стінка-потік теплоносія [2]. Відповідно, середня товщина цього Л шару є визначальною при проходженні кількості тепла в рекуперативній теплообмінній апаратурі.

Нами запропоновано розглядати процес руху рідин в трубопроводах чи апаратах із врахуванням сил поверхневого натягу на межі контакту тверде тіло-рідина [3, 4]. В цих роботах нами введений поверхневий критерій, який в приповерхневому Л шарі набуває великих значень в порівнянні з критеріями Фруда та Рейнольдса (1)

$$P_0 = \frac{1}{N} \frac{2\pi\sigma \cos \theta}{\mu v_x}, \tag{1}$$

де N – видозмінений критерій Рейнольдса,  $N = \frac{v_x \delta \rho}{\mu} = 10,47 - 11,5$  [5, с. 94],  $\mu$  – коефіцієнт динамічної в'язкості рідини, Па·с;  $\delta$  – товщина приграничного Л шару, м;  $\rho$  – густина рідини, кг/м<sup>3</sup>;  $\sigma$  – коефіцієнт поверхневого натягу на межі тверде тіло-рідина, Н/м;  $\cos \theta$  – гідрофільність поверхні змочування;  $v_x$  – швидкість пристінних шарів рідини, м/с

Цей критерій є дещо подібним до капілярного критерію [1, с. 161], але має інший фізичний зміст. В капілярний критерій входить швидкість піднімання рідини у капілярі в залежності від зміни коефіцієнта поверхневого натягу та коефіцієнта динамічної в'язкості рідини. В поверхневий критерій входить середня швидкість руху рідини  $v_x$  в пристінній області трубопроводу, а також видозмінений критерій Рейнольдса N та гідрофільність поверхні змочування  $\cos \theta$ .

Такий підхід дав нам можливість вивести нову формулу (2) для розрахунку середньої товщини приграничного Л шару [6]:

$$\delta = \frac{d^2}{Re \mu} \sqrt{\frac{2\sigma \tilde{m} s \theta \rho}{\lambda l}}, \tag{2}$$

де  $\sigma$  – коефіцієнт поверхневого натягу на межі тверде тіло-рідина, Н/м;  $\tilde{m} s \theta$  – гідрофільність поверхні стінки;  $\rho$  – густина рідини, кг/м<sup>3</sup>; d – діаметр живого перерізу потоку, м;  $\lambda$  – коефіцієнт Дарсі;

$\lambda = \frac{0,316}{Re^{0,25}}$ ; l – довжина трубопроводу, м;  $\mu$  – коефіцієнт динамічної в'язкості рідини, Па с;  $K_T$  – коефі-

цієнт турбулізації Л шару,  $\hat{E}_0 = \frac{Re_{\delta_0}}{Re_{\hat{\delta}}}$ ;  $Re_{кр} \approx 2320$ .

В роботах [7, 8] запропоновано спосіб підвищення загального коефіцієнта теплопередачі теплообмінної апаратури шляхом введення в теплоносій малих кількостей ПАР, які здатні суттєво зменшувати коефіцієнт поверхневого натягу теплоносія і мінімізувати середню товщину приповерхневого шару. Оптимальні концентрації природних ПАР (рослинних олій) у молоці, за яких коефіцієнт поверхневого натягу мінімальний, представлені нами в роботі [9].

Для визначення діапазону числових значень поверхневого критерію нами зроблено серію експериментів водних розчинів аніонактивних ПАР. В якості ПАР використовувались натрій лаурилсульфат,

та натрій алкансульфонат.

Важливою характеристикою ПАР є критична концентрація міцелоутворення (ККМ). Визначення ККМ ґрунтується на різкій зміні фізико-хімічних властивостей ПАР (коефіцієнта поверхневого натягу, еквівалентної електропровідності, показника заломлення та ін.). Для визначення ККМ здійснювали вимірювання коефіцієнтів поверхневого натягу водних розчинів вибраних ПАР. На кривій залежності коефіцієнта поверхневого натягу від концентрації, в області ККМ є екстремум, рис. 1, 2. Цей екстремум є точкою ККМ. Точка ККМ для натрій лаурилсульфату спостерігається при концентрації 0,202 мас.%, в якій коефіцієнт поверхневого натягу зменшується в 1,85 рази. Для натрій алкансульфонату ККМ спостерігається при концентраціях 0,18 мас.%. При цій концентрації коефіцієнт поверхневого натягу зменшується в 2,05 рази. Як видно з графіків, при незначному зростанні концентрацій ПАР, коефіцієнт поверхневого натягу різко зменшується до значення ККМ, а при концентраціях вище ККМ постерігається незначне його зменшення. Так, для натрій лаурилсульфату при концентрації 0,505 мас.% коефіцієнт поверхневого натягу зменшується в 1,92 рази. При концентрації 0,712 мас.% натрій алкансульфонату коефіцієнт поверхневого натягу зменшується в 2,15 рази. Однак, для розрахунків ми вибирали значення, за яких зміна коефіцієнта поверхневого натягу максимальна, а концентрацію при даних значеннях вважали оптимальною. При цих значеннях концентрацій вибирали і значення для коефіцієнта динамічної в'язкості.

Коефіцієнт поверхневого натягу визначали методом максимального тиску бульбашки (метод Ребіндера). Для визначення коефіцієнта динамічної в'язкості розчинів використовували метод віскозиметрії.

На рис. 1–2 показані залежності коефіцієнта поверхневого натягу та коефіцієнта динамічної в'язкості від концентрації ПАР.

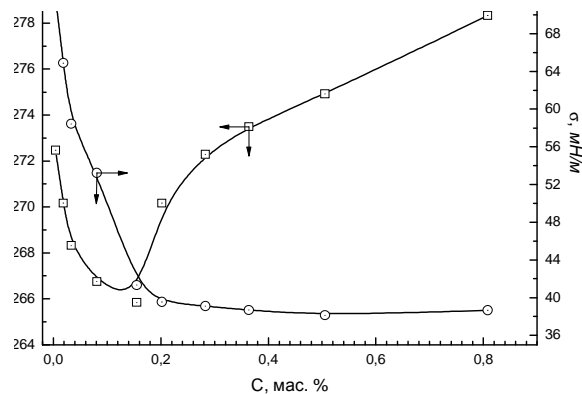


Рисунок 1 – Залежність коефіцієнта поверхневого натягу  $\sigma$  та коефіцієнта динамічної в'язкості  $\mu$  від концентрації натрій лаурилсульфату у воді

Рідина з меншим значенням коефіцієнта поверхневого натягу краще змочує поверхню твердого тіла. При цьому кут змочування стає більш гострим. Для визначення кута змочування використовували установку, яка дозволяє проектувати краплю на екран. Вимірявши основні розміри краплі (висоту, діаметр), розраховували кут змочування. На рис. 3 показано залежність косинуса кута змочування від концентрації ПАР.

Оскільки в поверхневій критерій входить середня товщина приграничного Л шару, то обчислювали її значення для води і для оптимальних концентрацій водних розчинів ПАР. Для цього у формулу (2) підставляли характеристики для води при температурі  $10^0$  С.

Середня швидкість руху рідин в трубопроводах на підприємствах харчової, фармацевтичної та переробної промисловостей становить  $v \approx 1 \text{ м} / \text{с}$ , діаметр трубопроводу  $d = 21 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ , довжина трубопроводу  $l = 3 \text{ м}$ . При цьому швидкість в пристінних шарах  $v_x \approx 0,1 \text{ м} / \text{с}$ .

Середня товщина приграничного Л шару

– для води за формулою (2):

$$\delta = \frac{(21 \cdot 10^{-3})^2}{16470,58 \cdot 1,29 \cdot 10^{-3}} \sqrt{\frac{2 \cdot 7,325 \cdot 10^{-2} \cdot 0,866 \cdot 1000}{2,789 \cdot 10^{-2} \cdot 3}} = 116 \cdot 10^{-6} \text{ м} ;$$



– для води + (0,505÷0,510) мас.% натрій лаурилсульфату за формулою (2):

$$\delta = \frac{\frac{(21 \cdot 10^{-3})^2}{16470,58 \cdot 1,275 \cdot 10^{-3}} \sqrt{\frac{2 \cdot 3,812 \cdot 10^{-3} \cdot 0,963 \cdot 1000}{2,789 \cdot 10^{-2} \cdot 3}}}{\frac{16470,58}{2320}} = 87 \cdot 10^{-6} \text{ і} ;$$

– для води + (0,712÷0,720) мас.% натрій алкансульфонату за формулою (2):

$$\delta = \frac{\frac{(21 \cdot 10^{-3})^2}{16483,52 \cdot 1,274 \cdot 10^{-3}} \sqrt{\frac{2 \cdot 3,06 \cdot 10^{-3} \cdot 0,971 \cdot 1000}{2,788 \cdot 10^{-2} \cdot 3}}}{\frac{16483,52}{2320}} = 83 \cdot 10^{-6} \text{ і} .$$

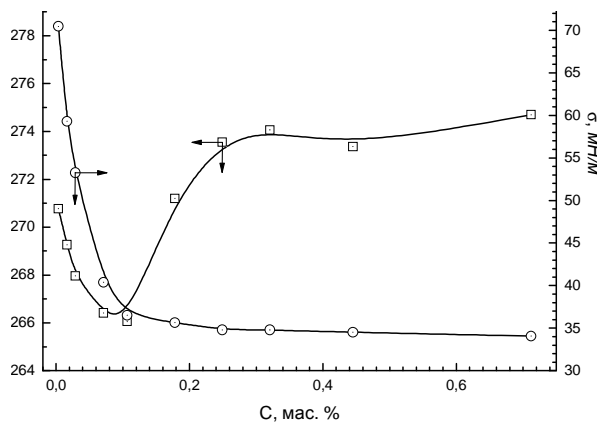


Рисунок 2 – Залежність коефіцієнта поверхневого натягу  $\sigma$  та коефіцієнта динамічної в'язкості  $\mu$  від концентрації натрій алкансульфонату у воді.

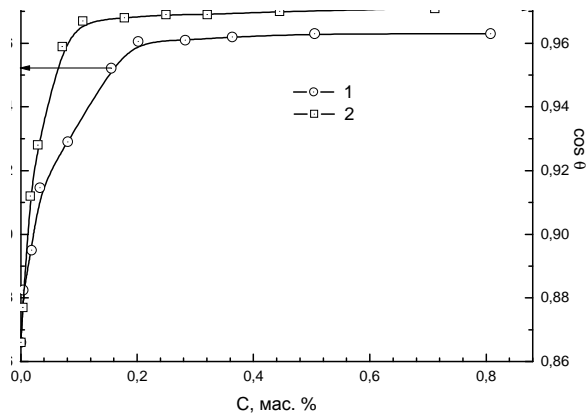


Рисунок 3 – Залежність кута змочування від концентрації ПАР  
1– натрій лаурилсульфат, 2 – натрій алкансульфонат

Отже, товщини Л шару під дією ПАР зменшились в 1,33 та 1,4 рази відповідно.

Швидкість в пристінних шарах знаходили з видозміненого критерію Рейнольдса, приймаючи значення  $N=10,5$  (формула 1).

Середня швидкість приграничного Л шару:

– для води

$$v_x = \frac{10,5 \cdot 1,29 \cdot 10^{-3}}{1,16 \cdot 10^{-4} \cdot 1000} = 0,116 \text{ [і / н]};$$

– для води + (0,505÷0,510) мас.% натрій лаурилсульфату

$$v_x = \frac{10,5 \cdot 1,275 \cdot 10^{-3}}{8,762 \cdot 10^{-5} \cdot 1000} = 0,153 \text{ [і / н]};$$

– для води + (0,712÷0,720) мас.% натрій алкансульфонату

$$v_x = \frac{10,5 \cdot 1,274 \cdot 10^{-3}}{8,33 \cdot 10^{-5} \cdot 1000} = 0,160 \text{ [і / н]}.$$

Отже, зі зменшенням товщини приграничного Л шару швидкість в ньому зростає і це інтенсифікує проходження кількості тепла через нього. Також енергія зв'язку між стінкою трубопроводу і приповерхневим шаром води зменшується, мінімізується «прилипання» рідини до стінок. Оскільки середня товщина Л шару суттєво залежить від коефіцієнта поверхневого натягу рідини, то і швидкість в приповерхневих шарах також залежить від нього.

Розглянемо переріз потоку в трубопроводі при турбулентному (Т) режимі руху рідини. Вектори швидкостей в ньому розподіляються подібно до параболи, але з більш широкою вершиною. Однак, при Т режимі біля стінок існує приграничний Л шар товщиною  $\delta$ . Внаслідок взаємного тертя та «прилипання» рідини до стінок, швидкість руху потоку  $v_x$  біля самої стінки прямує до нуля і при віддаленні від стінки збільшується.

Оскільки при зменшенні товщини цього приграничного Л шару швидкість в пристінній області зростає, то крива розподілу векторів швидкостей в цій області буде зростати швидше (рис. 4)

Визначали числові значення поверхневого критерію

$$\text{– для води } P_0 = \frac{1}{N} \frac{2\pi\sigma \cos \theta}{\mu v_x} = \frac{1}{10,5} \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 73,25 \cdot 10^{-3} \cdot 0,866}{1,29 \cdot 10^{-3} \cdot 0,116} = 253,54;$$

– для води + (0,505÷0,510) мас.% натрій лаурилсульфату

$$P_0 = \frac{1}{N} \frac{2\pi\sigma \cos \theta}{\mu v_x} = \frac{1}{10,5} \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 38,12 \cdot 10^{-3} \cdot 0,963}{1,275 \cdot 10^{-3} \cdot 0,153} = 112,56;$$

– для води + (0,712÷0,720) мас.% натрій алкансульфонату

$$P_0 = \frac{1}{N} \frac{2\pi\sigma \cos \theta}{\mu v_x} = \frac{1}{10,5} \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 34,06 \cdot 10^{-3} \cdot 0,971}{1,274 \cdot 10^{-3} \cdot 0,161} = 96,39.$$

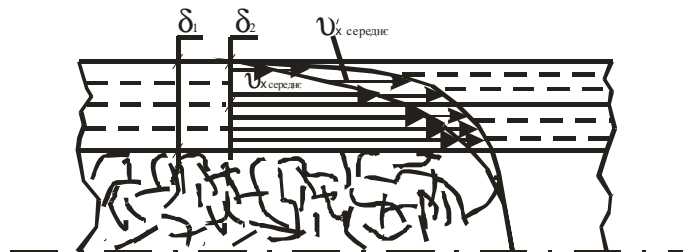


Рисунок 4 – Розподіл векторів швидкостей у приграничному Л шарі

Числовий діапазон поверхневого критерію для досліджуваних ПАР становить 96,39–112,56.

Отже, при малих концентраціях ПАР суттєво зменшується коефіцієнт поверхневого натягу теплоносія, середня товщина приповерхневого шару є мінімальною, середня швидкість в цьому шарі є максимальною, а числове значення поверхневого критерію – мінімальне.

На рис. 5 показано залежність поверхневого критерію від концентрацій натрій лаурилсульфату та натрій алкансульфонату у воді.

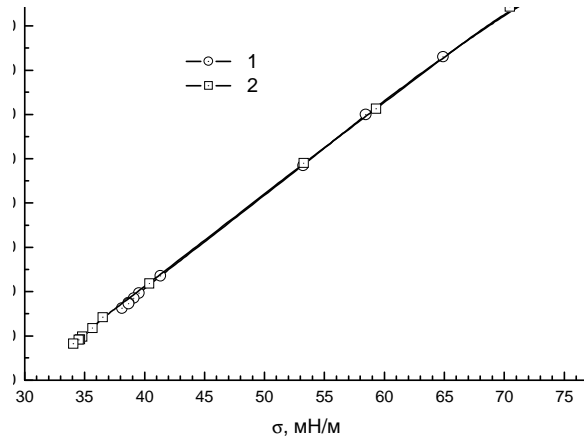


Рисунок 5 – Залежність поверхневого критерію від концентрацій  
1 – натрій лаурилсульфату, 2 – натрій алкансульфонату

Оскільки всі значення поверхневого критерію  $P_0$  лежать на прямій і накладаються, то такої залежності, вимірявши коефіцієнт поверхневого натягу  $\sigma$  після введення ПАР у теплоносії, можна визначити поверхневий критерій та швидкість у приповерхневому шарі  $U_x$ .

$$P_0 = \frac{1}{N} \frac{2\pi\sigma \cos \theta}{\mu v_x} = \frac{\mu}{v_x \delta r} \frac{2\pi\sigma \cos \theta}{\mu v_x} = \frac{2\pi\sigma \cos \theta}{\mu v_x^2}. \quad (3)$$

Дослідження числового діапазону поверхневого критерію неіоногенних ПАР водних розчинів, а також природних ПАР (рослинних олій) у молоці буде предметом подальших досліджень.

### Висновки

1. Знайдено числовий діапазон поверхневого критерію (96,39–112,56) для водних розчинів досліджуваних ПАР. Показано, що мінімальне значення поверхневого критерію спостерігається при оптимальних концентраціях ПАР.

2. Зменшення коефіцієнта поверхневого натягу мінімізує товщини приграничних шарів у системі стінка трубопроводу-вода у 1,33 та 1,4 рази, відповідно, та збільшує середні швидкості в цих приграничних Л шарах.

3. Оптимальні кількості натрій лаурилсульфату та натрій алкансульфонату у воді зменшують коефіцієнт поверхневого натягу у 1,92 та 2,15 рази, відповідно.

### Література

1. Минаковский В. М. Обобщенные переменные теории переноса. /В.М. Минаковский – К. : «Вища школа», 1978. – 179с.
2. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя / Г. Шлихтинг. [пер. с нем.]. – М. : Наука, 1974. – 711 с.
3. Білонога Ю.Л. Про доцільність розгляду гідромеханічних процесів з урахуванням сил поверхневого натягу на границі контакту тверде тіло-рідина / Ю.Л. Білонога // Ж. Інтегровані технології та енергозбереження. – 2006. – №2. – С. 56–64.
4. Білонога Ю.Л. Інтенсифікація та оптимізація тепломасообмінних процесів при виробництві органопрепаратів і переробці вторинної сировини м'ясокомбінатів: автореферат дис. на здобуття наук. ступеня доктора техн. наук: спец.05.18.12»Процеси та обладнання харчових, мікробіологічних та фармацевтичних виробництв» / Ю.Л. Білонога – Одеса, 2006. – 36 с.

5. Кук Г.А. Процессы и аппараты молочной промышленности / Г.А. Кук – М. : Пищевая промышленность, 1973. – 767 с.
6. Білонога Ю.Л., Максисько О.Р., Ціж Б.Р., Варивода Ю.Ю. Підвищення коефіцієнта теплопередачі теплообмінної апаратури при використанні ПАР Ю.Л Білонога, О.Р. Максисько, Б.Р. Ціж, Ю.Ю. Варивода // //Науковий вісник Львівської державної академії ветеринарної медицини імені С.З. Гжицького. – 2004. – Т.6, №2. – Ч.3. – С. 126–131.
7. Білонога Ю.Л., Максисько О.Р. Підвищення коефіцієнта теплопередачі кожухотрубного теплообмінника при теплової обробці молока / Ю.Л. Білонога, О.Р. Максисько //Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. –2005. – Випуск 38. – С. 82–85.
8. Кравців Р.Й. Білонога Ю.Л., Максисько О.Р., Занічковська Л.В. Спосіб інтенсифікації теплопередачі в системі холодоносій (вода) – стінка теплообмінника-молоко. Подана заявка. У 2008 № 15169 від 29.12.2008.
9. Білонога Ю.Л., Максисько О.Р. Оптимізація концентрацій рослинних поверхнево-активних речовин (ПАР) в молоці для інтенсифікації теплопередачі в системі стінка теплообмінника-потік / Ю.Л. Білонога, О.Р. Максисько //Наукові праці ОНАХТ. – 2008. –Випуск № 32. –С. 200–204.

Bibliography (transliterated)

1. Minakovskij V. M. Obobshchennye peremennye teorii perenosa. V.M. Minakovskij – K. : «Vishha shkola», 1978. – 179p.
2. Shlihting G. Teoriya pogrannichnogo sloja G. Shlihting. [per. s nem.]. – M. : Nauka, 1974. – 711 p.
3. Bilonoga Ju.L. Pro docil'nist' rozgljadu gidromehanicnih procesiv z urahuvannjam sil poverhnevogo natjagu na granici kontaktu tverde tilo-ridina Ju.L. Bilonoga Zh. Integrovani tehnologii ta energozberezhenja. – 2006. – #2. – P. 56–64.
4. Bilonoga Ju.L. Intensifikacija ta optimizacija teplomasoobminnih procesiv pri virobniectvi organopreparativ i pererobci vtorinnoi sirovini m'jasokombinativ: avtoreferat dis. na zdobuttja nauk. stupenja doktora tehn. nauk: spec.05.18.12»Procesi ta obladnannja harchovih, mikrobiologichnih ta farmacevticnih virobniectv» Ju.L. Bilonoga – Odesa, 2006. – 36 p.
5. Kuk G.A. Processy i apparaty molochnoj promyshlennosti G.A. Kuk – M. : Pishhevaja promyshlennost', 1973. – 767 p.
6. Bilonoga Ju.L., Maksis'ko O.R., Cizh B.R., Varivoda Ju.Ju. Pidvishhennja koeficienta teploperedachi teploobminnoi aparatury pri vikoristanni PAR Ju.L Bilonoga, O.R. Maksis'ko, B.R. Cizh, Ju.Ju. Va-rivoda Naukovij visnik L'vivs'koї derzhavnoi akademii veterinarnoi medicini imeni S.Z. Gzhic'kogo. – 2004. – Т.6, #2. – Ch.3. – P. 126–131.
7. Bilonoga Ju.L., Maksis'ko O.R. Pidvishhennja koeficienta teploperedachi kozhuhotrubnogo teploobminnika pri teplovoj obrobci moloka Ju.L. Bilonoga, O.R. Maksis'ko Visnik Harkivs'kogo nacio-nal'nogo tehnicnogo universitetu sil's'kogo gospodarstva imeni Petra Vasilenka. –2005. – Vipusk 38. – P. 82–85.
8. Kravciv R.J. Bilonoga Ju.L., Maksis'ko O.R., Zanic'kovs'ka L.V. Sposib intensifikacii teploperedachi v sistemі holodonosij (voda) – stinka teploobminnika-moloko. Podana zajavka. U 2008 # 15169 vid 29.12.2008.
9. Bilonoga Ju.L., Maksis'ko O.R. Optimizacija koncentracij roslinnih poverhnevo-aktivnih re-chovin (PAR) v moloci dlja intensifikacii teploperedachi v sistemі stinka teploobminnika-potik Ju.L. Bilonoga, O.R. Maksis'ko Naukovi pracі ONAHT. – 2008. –Vipusk # 32. –P. 200–204.

УДК 664.661.12.]. 021.3

Білонога Ю.Л., Максисько О.Р.

**ИЗМЕНЕНИЕ ГИДРОМЕХАНИЧЕСКИХ И ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК  
ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В ПРИГРАНИЧНОМ СЛОЕ  
ПОД ДЕЙСТВИЕМ ПОВЕРХНОСТНО-АКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ (ПАВ)**

В статье показаны изменение гидромеханических и теплофизических характеристик теплоносителя, который движется в трубе или аппарате, а именно, в приграничном слое под действием анионных поверхностно-активных веществ (ПАВ). Экспериментально определены оптимальные концентрации исследуемых ПАР в воде, при которых коэффициент поверхностного натяжения минимальный. Показано,

что уменьшение коэффициента поверхностного натяжения минимизирует толщину приграничного L слоя в системе стенка трубопровода-вода, а значит, увеличивает среднюю скорость потока в нем. Найден числовой диапазон поверхностного критерия для водных растворов исследуемых ПАВ. Минимальное значение поверхностного критерия наблюдается при оптимальных концентрациях ПАВ.

Bilonoha Y.L., Maksysko O.R.

**A CHANGE OF HYDROMECHANICAL AND HEATING PHYSICAL CHARACTERISTICS OF  
HEAT-CARRYING AGENT IN BY LIMITING LAYER UNDER THE ACTION  
OF SURFACTANTS**

The article deals with the change of hydromechanical and heating physical characteristics of heat-carrying agent, that move in tube of apparatus, namely, in by-limiting layer under the action of anionic surfactants. It was found out experimentally the optimal concentrations steam, which are investigated in water, the coefficient of surface tension was minimal. It was also shown that a reduce of surface tension coefficient minimize a thickness of by-limiting L layer in system of pipeline – water wall, it means that it increase an average speed of stream in this L layer. Numerical range of surface criterion for water solution surfactants. Were found out and are investigating. Minimal meaning of surface criterion are observed at optimal concentrations surfactants.

УДК 662.743

Шевченко Г.Л., Шишко Ю.В., Губинський С.М., Кремнева Є.В., Усенко А.Ю.

### ВІЗУАЛІЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ ФІЛЬТРАЦІЙНОГО ГОРІННЯ У ЩІЛЬНОМУ ШАРІ БІОМАСИ

**Актуальність проблеми.** Нестабільне економічне і енергетичне становище у світі та Україні створює попит на технології, які дозволяють споживачам зменшити придбання енергоносіїв зі сторони за рахунок використання, так званих, «місцевих палив» – лущиння соняшника та гречихи, шкарлупа гречцького горіха та ін. При цьому, технології для масового використання повинні задовольняти вимогам енергетичної та екологічної ефективності, надійності в експлуатації та бути простими в реалізації.

**Мета дослідження.** Одним з ефективних рішень цієї проблеми є застосування процесу термічної переробки біомаси шляхом піролізу у щільному шарі в реакторі шахтного типу з організацією режиму фільтраційного горіння. Такий процес дозволяє отримати паливний газ та твердий вуглистый залишок (біовугілля), який можливо переробляти далі шляхом газифікації або використовувати у твердому вигляді.

Для впровадження запропонованої технології серед широкого кола споживачів необхідно мати відпрацьований механізм керування параметрами процесу, який дозволить отримувати кінцеві продукти заданої кількості та якості. Режим фільтраційного горіння передбачає поступове переміщення теплової хвилі фронту горіння по висоті шару біомаси з одночасним розкладанням біомаси у фронті горіння на тверду та газоподібну фази. Отже, для надійного керування процесом необхідно детальне вивчення основних характеристик, що впливають на інтенсивність руху теплової хвилі по висоті шару біомаси, а саме:

- швидкість руху та товщина фронту горіння;
- насипна щільність та порозність шару біомаси;
- рівномірність руху теплової хвилі по перетину нерухомого шару;
- теплопровідність матеріалу.

На кафедрі промислової теплоенергетики НМетАУ були проведені експериментальні дослідження вищезазначених параметрів шляхом візуального спостереження за механізмом руху фронту горіння, визначено основні напрямки та режимні параметри при проведенні експериментів.

**Методика експериментальних досліджень.** Метою експериментальних досліджень було визначення основних чинників, що впливають на інтенсивність процесів теплопереносу у щільному шарі біомаси та візуальне спостереження за механізмом руху фронту горіння.

Для проведення експериментальних досліджень створено установку з візуалізації процесу термічної переробки біомаси у щільному шарі. Установка являє собою трубу з кварцового скла діаметром 135 мм, висотою 420 мм. Над трубою передбачено встановлення пальника на природному газі для організації спалювання продуктів піролізу. Схему експериментальної установки наведено на рис. 1.

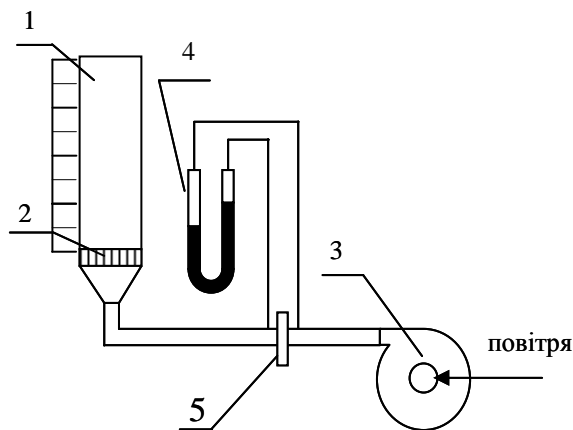


Рисунок 1 – Схема експериментальної установки:

- 1 – труба кварцова; 2 – сітка, що розподіляє повітря; 3 – вентилятор; 4 – дифманометр;  
5 – діафрагма для виміру витрати повітря

Дослідження проводилися за наступною методикою. Біомаса зважувалась та завантажувалась у кварцову трубу. Далі верхній шар біомаси підпалювався, а знизу подавався потік повітря зі сталою шви-

джістю. Фронт горіння, що утворювався, поступово просувався зверху вниз, на зустріч потоку повітря. Піролізні гази, що виходили із шару біомаси, спалювались над ним за допомогою запального пальника.

Під час експериментальних досліджень фіксувалась витрата повітря через шар біомаси. Візуально визначалася швидкість руху фронту горіння, його товщина та інтенсивність виходу і горіння піролізних газів.

У якості біомаси було досліджено шкарлупу грецького горіха, лушпиння гречихи, солому, тирсу. Данні по фракційному складу досліджуваної біомаси наведено в табл. 1 [1].

Таблиця 1 – Лінійні розміри часток деяких видів біомаси

Вид біомаси	Діапазон зміни довжини часток, мм	Діапазон зміни ширини часток, мм	Діапазон зміни площі поверхні часток, мм <sup>2</sup>
Шкарлупа грецького горіха	4,5–22,8	2,43–15,73	11,5–376,8
Лушпиння гречихи	3,7–8,1	3,2–5,6	29,2–78,1
Тирса	0,5–5	–	–
Солома	5–100	1–3	–

У експериментальних дослідженнях основні режимні параметри змінювалися у наступних діапазонах: температура повітря на вході в шар 0–10 °С, висота шару біомаси складала 40–42 см, швидкість руху повітря – 0,5–6,0 м/хв. Максимальна швидкість була обмежена швидкістю, при якій частки біомаси або біовугілля, що утворилося після піролізу, виносилися із труби. Для шкарлупи горіха максимальна швидкість повітря складала 4–6 м/хв., для всіх інших видів дослідженої біомаси вона не перевищувала 1,5–1,8 м/хв.

**Результати досліджень.** На рис. 2 наведено фото процесу піролізу шкарлупи грецького горіха та схематично представлено розташування теплової хвилі по висоті біомаси.

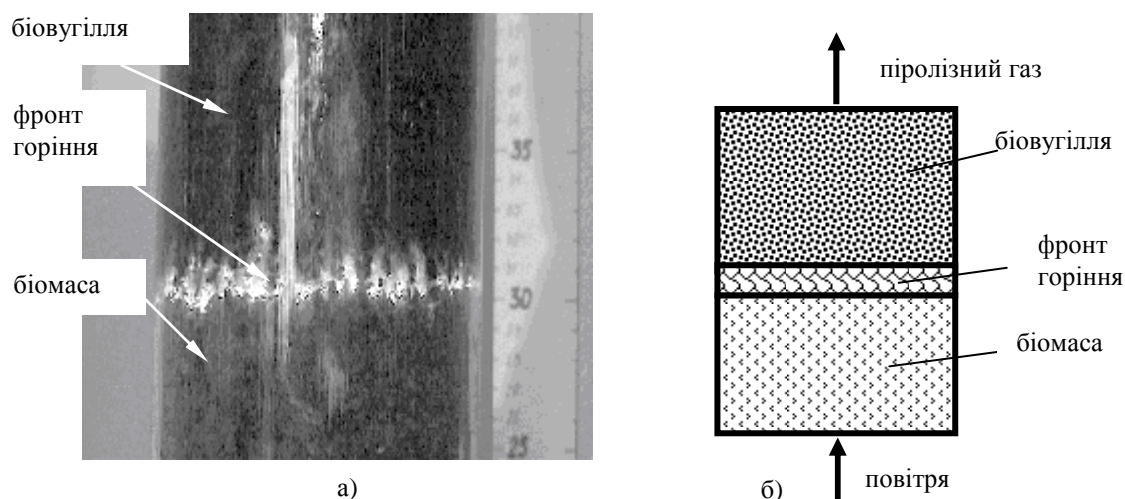


Рисунок 2 – Фільтраційне горіння шару біомаси:  
а) фото процесу фільтраційного горіння шкарлупи грецького горіха; б) схема процесу

З візуальних спостережень руху фронту горіння можна зробити наступні висновки. Рух фронту горіння відбувається завдяки переносу теплоти у наступний шар за рахунок випромінюванні розігрітих часток, теплопровідності матеріалу біомаси при безпосередньому контакту розігрітих і холодних часток та при так званому «масопереносі» нагрітих частинок у холодний шар. Останній механізм теплопереносу

обумовлений тим, що у фронті горіння при активізації процесу піролізу (температура шару 300 °С і більше) спостерігається розщільнення шару за рахунок виходу летючих продуктів розкладення. Таким чином, розігріті частинки біомаси провалюються у пори, які утворюються у наступному шарі і інтенсифікують рух фронту горіння.

З другого боку потік холодного повітря охолоджує шар біомаси, що примикає до фронту горіння. Відповідно рух фронту горіння і реалізація процесу можливі тільки при виконанні наступної вимоги: сума теплових потоків нагріву шару біомаси випромінюванням  $q_{\text{вип}}$ , теплопровідністю  $q_{\text{теп}}$  та в результаті «масопереносу» часток  $q_{\text{част}}$  повинна перевищувати конвекційний тепловий потік  $q_{\text{конв}}$  охолодження біомаси повітрям

$$q_{\text{вип}} + q_{\text{теп}} + q_{\text{част}} > q_{\text{конв}} \quad (1)$$

Однією з основних характеристик процесу піролізу при фільтраційному горінні є показник нерівномірності та стабільності фронту горіння. На нерівномірність руху фронту горіння впливають наступні чинники:

- нерівномірне запалювання поверхні шару біомаси;
- нерівномірність фракційного складу біомаси;
- геометрична форма часток біомаси;
- рівномірність розподілу повітря по перетину шару.

На рис. 3 наведено фотографії руху теплової хвилі для експериментів із лушпинням гречихи у різні моменти часу. Результати аналізу спостережень свідчать про стійкий характер руху теплової хвилі нерівномірність сходу фронту горіння не перевищувала 2–3 см для шкарлупи волоського горіха та лушпиння гречки.

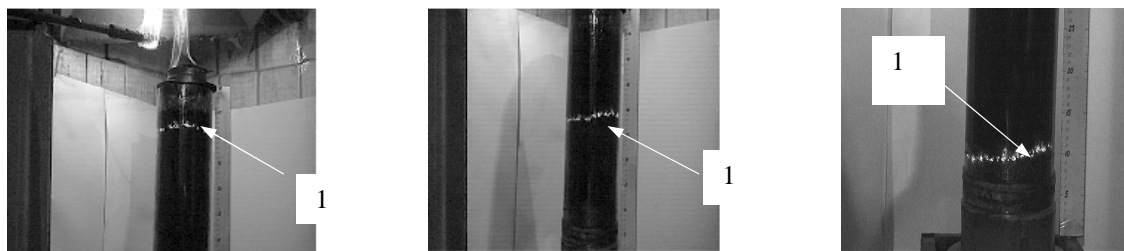


Рисунок 3 – Рух теплової хвилі (1) під час експерименту із лушпинням гречихи

Експерименти підтвердили суттєве значення рівномірності початкового розподілу фронту горіння по перетину нерухомого шару на стабільність процесу. При нерівномірному початковому розпалюванні верхнього шару, фронт горіння рухається також нерівномірно.

Чим більша нерівномірність фракційного складу біомаси, тим більш негативно це впливає на стабільність фронту горіння. В цьому випадку, навіть при рівномірному запалюванні поверхні шару, через деякий час можливо спостерігати порушення рівномірності та стабільності руху теплової хвилі та рух фронту на локальній частині шару. Такий характер процесу обумовлюється нерівномірним розподілом повітря по перетину шару у зв'язку з значною зміною порозності шару. Саме такий характер процесу спостерігався при піролізі соломи та тирси.

Якщо в якийсь момент утворювалися явно визначені канали, по яким повітря йде крізь шар, такі канали будуть дуже стійкими допоки фронт не пройде всю висоту шару. Завдяки цьому, горіння відбувається саме у цих каналах, а решта біомаси залишається без доступу окислювача. Збільшення витрати повітря крізь шар практично не впливає на зміну каналів, що утворилися. Зруйнувати їх може або різка, штовхообразна, зміна витрати повітря. Для тирси стійке каналутворення обумовлено також геометричною формою часток, поганою текучістю, здатністю к підвисанню відходів біомаси.

Для лушпиння гречихи товщина фронту горіння складала 1–1,5 см, швидкість руху теплової хвилі 1,5–1,7 см/хв., для шкарлупи грецького горіха: товщина фронту 2–4 см, швидкість руху хвилі 0,4–0,6 см/хв.



**Висновки.** Виконано експериментальні дослідження, що дозволили візуально спостерігати рух фронту горіння при термічній обробці щільного шару біомаси. На основі отриманих результатів сформульовано механізм теплопередачі при піролізі біомаси у щільному шарі, який на ряду з відомими складовими містить теплопередачу в результаті «масопереносу» гарячих часток біомаси у холодні шари.

Визначено основні чинники, що впливають на інтенсивність та стабільність руху фронту горіння крізь шар біомаси: нерівномірне запалювання поверхні шару, нерівномірність фракційного складу, геометрична форма часток біомаси, рівномірність розподілу повітря по перетину шару.

### Література

1. Шевченко Г.Л., Шишко Ю.В., Усенко А.Ю., Кремнева Е.В. Исследование основных характеристик отходов биомассы как топлива // Металургійна теплотехніка: Збірник наукових праць Національної металургійної академії України. – Дніпропетровськ: "ПП Грек О.С.", 2007.– С. 305–313.

### Bibliography (transliterated)

1. Shevchenko G.L., Shishko Ju.V., Usenko A.Ju., Kremneva E.V. Issledovanie osnovnyh harakteristik othodov biomassy kak topliva Metalurgijna teplotehnika: Zbirnik naukovih prac' Nacional'noi metalurgijnoi akademii Ukraïni. – Dnipropetrovs'k: "PP Grek O.S.", 2007.– P. 305–313.

УДК 662.743

Шевченко Г.Л., Шишко Ю.В., Губинский С.М., Кремнева Е.В., Усенко А.Ю.

### ВИЗУАЛІЗАЦІЯ ПРОЦЕСА ФІЛЬТРАЦІОННОГО ГОРЕННЯ В ПЛОТНОМ СЛОЕ БІОМАСИ

Виконано експериментальні дослідження, що дозволяють візуально спостерігати рух фронту горіння при термічній обробці щільного шару біомаси. Визначено основні фактори, що впливають на інтенсивність руху фронту горіння крізь шар біомаси.

Shevchenko G.L., Shyshko Yu.V., Gubinsky S.M., Kremneva E.V., Usenko A.Yu

### THE VISUALIZATION OF FILTRATIVE BURNING PROCESS IN DENSE LAYER OF BIOMASS

The experimental researches were carried out that lets to observe visually the movement of burning front during thermal treatment of the biomass dense layer. The essential factors that influence on front movement intensity are defined.

УДК 662.764

Пинчук В.А., Шарабура Т.А., Потапов Б.Б.

**ОСОБЕННОСТИ ГАЗИФИКАЦИИ ВОДОУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА  
В ГАЗИФИКАТОРАХ ЦИКЛОННОГО ТИПА**

Учитывая необходимость увеличения доли угля в топливно-энергетическом балансе Украины и экологические проблемы, возникающие при его использовании, создание технологий переработки и использования угля, которые позволят максимально использовать его преимущества, а также минимизировать сложность его применения, является перспективным направлением развития энергетики [1].

Одним из направлений для угольной энергетики может стать переход от прямого сжигания угля в топочных устройствах на приготовление из углей различных марок, в том числе и из отходов углеобогащения и шламов, водоугольного топлива. Водоугольное топливо имеет свойства, позволяющие заменять им твердое, жидкое и газообразное топливо в различных топливопотребляющих агрегатах без существенной их реконструкции, а при необходимости возможно совместное использование водоугольного топлива и других видов топлива – газа, мазута, угля.

Водоугольное топливо – искусственное композиционное топливо, представляющего собой дисперсную топливную систему, состоящую из тонкоизмельченного угля, воды и реагента-пластификатора. В зависимости от требований, предъявляемых потребителем, технологии производства топлива могут различаться весьма существенно (от измельчения до глубокого обогащения, термического и другого физико-химического воздействия на исходное сырье или промежуточные продукты). В процессе производства водоугольного топлива его твердая фаза (органическая масса угля, его минеральные составляющие, водонерастворимые химические присадки) при необходимости может быть существенно модифицирована в направлении повышения теплоты сгорания угольного вещества путем удаления из него кислородсодержащих соединений, существенного снижения зольности, уменьшения содержания серы и др. Технология производства водоугольного топлива позволяет получать топливо с заданными потребительскими свойствами. Теплота сгорания водоугольного топлива из каменных углей может достигать 21 МДж/кг, из бурых – 16 МДж/кг при содержании твердой фазы 50–70 % [2].

К преимуществам использования водоугольного топлива относится следующее: возможность использования низкосортных углей, углеотходов и шламов при изготовлении водоугольного топлива; взрыво- и пожаробезопасность на всех технологических стадиях приготовления и транспортирования; снижение вредных выбросов и уменьшение запыленности атмосферы угольной пылью; возможность длительного хранения и транспортировки с сохранением заданных свойств [2–4].

Широкому использованию водоугольного топлива препятствуют затраты на процесс получения топлива, нерациональные способы его термической переработки, что приводит к повышенным энергозатратам, необходимость создания инфраструктурного трубопроводов.

Одним из рациональных направлений использования водоугольного топлива является газификация. К преимуществам применения водоугольного топлива в целях газификации относят следующее: отсутствие потребности сушки угля с ее высокими энергозатратами; снижение потребности кислорода в процессе газификации; возможность безотказной автоматизации процесса подачи водоугольного топлива; снижение требований к безопасности процесса.

Для водоугольного топлива предлагается использование технологии поточной автотермической газификации в закрученном потоке, что обеспечивает высокую интенсивность процесса и высокую степень конверсии углерода. С целью определения основных параметров процесса газификации проведены исследования газификации водоугольного топлива (уголь 70 %, вода 29 %, реагент-пластификатор 1 %) при воздушном и кислородном дутье. Состав рабочей массы водоугольного топлива, для которого проводились исследования газификации, представлен в таблице 1.

Таблица 1 – Состав рабочей массы водоугольного топлива, %

С	Н	N	S	O	A	W	ПАВ
49,4	3,5	0,9	1,7	6,5	8	29	1

Исследовано влияние коэффициента расхода окислителя на температурный режим процесса газификации и образование восстановительных (CO и H<sub>2</sub>) и окислительных (CO<sub>2</sub> и H<sub>2</sub>O) компонентов генераторного газа при воздушной и кислородной газификации водоугольного топлива. Исследования проводились в диапазоне коэффициента расхода окислителя от 0,3 до 0,5 в широком диапазоне температур.

Исследованиями было установлено, что границы стабильного содержания восстановительных компонентов в генераторном газе определяются рациональным коэффициентом расхода окислителя для воздушной и кислородной газификации. Результаты исследований представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Рациональные показатели процесса газификации водоугольного топлива

Показатели	Окислитель-воздух		Окислитель-кислород
	без подогрева	с подогревом	
Температура в реакторе, °С	1050–1100		
Состав газа, об. %			
CO+H <sub>2</sub>	32–34	42–43	82–83,6
CO <sub>2</sub> +H <sub>2</sub> O	14–15	9–10,5	15–15,5
N <sub>2</sub>	50–51	46,5	0,4
Теплота сгорания газа, МДж/м <sup>3</sup>	4–4,2	5–5,1	9,9
Выход газа, м <sup>3</sup> /кг ВУТ	3,4	3,12	1,7
Расход ВУТ, кг на 1 м <sup>3</sup> газа	0,29	0,32	0,59
на 1 ГДж газа	7,17	6,36	5,91
Расход окислителя, м <sup>3</sup> на 1 кг ВУТ	2,19	1,83	0,35
на 1 м <sup>3</sup> газа	0,64	0,59	0,21
на 1 ГДж газа	15,7	11,6	2,08

Как видно из полученных данных, для воздушной и кислородной газификации исследуемого водоугольного топлива рациональным является коэффициент расхода окислителя равный 0,3–0,32. Анализ полученных данных позволил определить основные показатели процесса автотермической газификации водоугольного топлива при различных видах окислителя. Установлено, что процесс газификации целесообразно проводить при подогреве воздуха до 400–600 °С и подогреве водоугольного топлива до 150–200 °С. При газификации водоугольного топлива получается газ с содержанием 33–83 % восстановительных компонентов, 14–15 % окислительных компонентов и теплотой сгорания 4–9,9 МДж/м<sup>3</sup> в зависимости от вида окислителя. Полнота проработки водоугольного топлива в процессе поточной газификации составляет 98,5–99,7 %, что значительно выше, чем при пылевидном сжигании угля (85–90 %).

Реализацию процесса газификации водоугольного топлива предлагается осуществлять в циклонном газификаторе. Предлагается применение двухкамерного циклонного газификатора с горизонтальной осью цилиндрических камер [5]. Ввод водоугольного топлива осуществлялся в первую камеру через ротационную форсунку, которая обеспечивает достаточно высокую степень распыливания топлива при относительно небольшом давлении, а окислитель, в количестве необходимом для выхода и горения летучих топлива, вводится тангенциально. Тангенциальный подвод энергоносителей обеспечивает интенсивную крутку потока в рабочем объеме [6]. В первой камере водоугольный поток встречается с потоком окислителя и происходит выход и горение летучих топлива. Продукты сгорания летучих и коксовый остаток через пережим поступают в камеру газификации. Вторичный воздух для газификации подается тангенциально по ходу движения потока продуктов предварительной переработки топлива из первой камеры. В результате термохимических процессов в объеме камеры происходит газификация топлива.

Как показали исследования использование водоугольного топлива предпочтительней и с экологической точки зрения. Исследовано влияние температуры в реакторе-газификаторе на образование серо- и азотосодержащих веществ при воздушной газификации. Сопоставление количества серо- и азотосодержащих веществ, образующихся при сжигании различных видов топлива, приведены в таблицах 3 и 4.

Представленные данные показывают, что наименьшее количество серо- и азотосодержащих веществ содержится в продуктах сгорания генераторного газа, полученного из водоугольного топлива.

Требования комплексной переработки являются важным компонентом эффективности технологии производства и использование водоугольного топлива. При термической переработке водоугольного топлива необходимо рациональное использование его минеральной части путем выделения редких элементов и для производства дорожно-строительных материалов. Таким образом, использование угля в виде водоугольного топлива для технологических и энергетических целей позволяет существенным образом улучшить теплотехнические и экологические показатели процесса термической переработки.

Таблиця 3 – Количество серо- и азотосодержащих веществ, образующихся при сжигании различных видов топлива

Вредное вещество	Количество некоторых вредных веществ в продуктах сгорания, мг/м <sup>3</sup>		
	угля	водоугольного топлива	генераторного газа, полученного из ВУТ
S	2,52–8,89	0,997–3,95	0,252–0,845
SH	0,685–2,23	0,439–1,57	0,11–0,331
H <sub>2</sub> S	0,0711–0,201	0,0779–0,239	0,0188–0,0477
HSO	0,0131–0,0361	0,00791–0,0241	0,00168–0,00451
SOH	0,141–0,344	0,0979–0,258	0,0194–0,0455
HSOH	0,00317–0,00743	0,00341–1,00854	0,000689–0,00151
COS	0,0614–0,183	0,0343–0,111	0,00863–0,0229

Таблиця 4 – Количество NO<sub>x</sub> и SO<sub>x</sub> в продуктах сгорания различных видов топлива

Вредное вещество	Количество вредных веществ в продуктах сгорания, г/м <sup>3</sup>		
	угля	водоугольного топлива	генераторного газа, полученного из ВУТ
SO <sub>x</sub>	570–663	570–590	60–100
NO <sub>x</sub>	389–519	218–308	239–343

Литература

1. Потапов Б.Б., Пинчук В.А. Проблемы и перспективы использования в металлургии углей и продуктов их переработки // Интегровані технології та енергозбереження. –2006.– №2.– С. 122–125.
2. Трубецкой К.Н. Проблемы внедрения водоугольного топлива в России // Уголь. – 2004.– №9.– С. 41–46.
3. Десягин Г.Н, Петраков А.П., Головин Г.С, Горлов Е.Г. Водные дисперсионные системы на основе бурых углей как энергетическое и технологическое топливо //Российский химический журнал. – 1997.– №6.– С. 72–77.
4. Саламатин А.Г. О состоянии и перспективах использования водоугольного топлива в России //Уголь. –2000.– №3.– С. 10–15.
5. Пинчук В.А., Губинский М.В., Потапов Б.Б. Использование водоугольного топлива и продуктов его переработки в энергетике и металлургии // Металургійна техніка: Збірка наукових праць Національної металургійної академії України.–Дніпропетровськ: «Нова ідеологія».–2008.–с. 221–227.
6. Циклонные топки / Под ред. Кнорре Г.Ф, Наджарова М.А. – М.: Государственное энергетическое издательство, 1958.– 216 с.

Bibliography (transliterated)

1. Potapov B.B., Pinchuk V.A. Problemy i perspektivy ispol'zovanija v metallurgii uglej i produktov ih pererabotki Integrovani tehnologii ta energozberezhenija. –2006.– #2.– p. 122–125.
2. Trubeckoj K.N. Problemy vnedrenija vodougol'nogo topliva v Rossii Ugol'. – 2004.– #9.– p. 41–46.
3. Deljagin G.N, Petrakov A.P., Golovin G.S, Gorlov E.G. Vodnye dispersionnye sistemy na os-nove buryh uglej kak jenergeticheskoe i tehnologicheskoe toplivo Rossijskij himicheskij zhurnal. –1997.– #6.– p. 72–77.
4. Salamatina A.G. O sostojanii i perspektivah ispol'zovanija vodougol'nogo topliva v Rossii Ugol'. – 2000.– #3.– p. 10–15.
5. Pinchuk V.A., Gubinskij M.V., Potapov B.B. Ispol'zovanie vodougol'nogo topliva i produktov ego pererabotki v jenergetike i metallurgii Metalurgijna tehnika: Zbirka naukovih prac' Nacional'noї metalurgijnoї akademii Ukraїni.–Dnipropetrovs'k: «Nova ideologija».–2008.–p. 221–227.
6. Ciklonnye topki / Pod red. Knorre G.F, Nadzharova M.A. – M.: Gosudarstvennoe jenergeticheskoe izdatel'stvo, 1958.– 216 p.

УДК 662.764

Пінчук В.О., Шарабура Т.А., Потапов Б.Б

**ОСОБЛИВОСТІ ГАЗИФІКАЦІ ВОДОВУГІЛЬНОГО ПАЛИВА В ГАЗИФІКАТОРАХ**

**ЦИКЛОНОГО ТИПУ**

Проведено аналіз характеристик водовугільного палива й особливостей його термічної переробки. Представлено результати досліджень процесу потокової газифікації водовугільного палива і розглянуті екологічні аспекти його переробки. Розглянуто особливості конструкції газифікатора циклонного типу стосовно для водовугільного палива.

Pinchuk V.O., Sharabura T.A., Potapov B.B.

**THE FEATURES OF WATER-COAL FUEL GASIFICATION IN CYCLONE-TYPE UNITS**

The analysis of water-coal fuel and its conversion process features was carried out. The results of water-coal fuel gasification-in-stream are presented and environmental scope of problem is discussed. The design features of cyclone-type unit for water-coal fuel gasification are discussed too.

Форись С.Н., Губинский М.В., Федоров С.С., Федоров О.Г., Ковпак А.Г.

**РАЗРАБОТКА ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ШАХТНЫХ ПРОТИВОТОЧНЫХ ИЗВЕСТКОВО-ОБЖИГОВЫХ ПЕЧЕЙ**

**Актуальность проблемы.** Особенностью работы шахтных противоточных известково-обжиговых печей является неудовлетворительное перемешивание топлива и окислителя в слое кускового материала. Поэтому такие печи характеризуются значительным химическим недожогом топлива и неравномерным качеством обработки материала [1,2]. Фактический удельный расход топлива при этом превышает проектные показатели на 20÷30 %. Таким образом, вопросы повышения эффективности сжигания природного газа в данных агрегатах имеют большое практическое значение.

**Цель.** Целью данной работы явилась разработка оптимальных режимов эксплуатации шахтных известково-обжиговых печей, обеспечивающих снижение удельного расхода природного газа при заданных технологических параметрах: производительности и качестве готового продукта.

В качестве объекта исследования в работе выбрана шахтная противоточная известково-обжиговая печь с центральным и периферийным подводами топлива проектной суточной производительностью по извести 200 т/сут (рис.1) [4]. Печь отапливается природным газом, подвод воздуха осуществляется в основание печи. Конструкция центральной горелки предусматривает подачу топлива, рециркулята и некоторой части первичного воздуха.

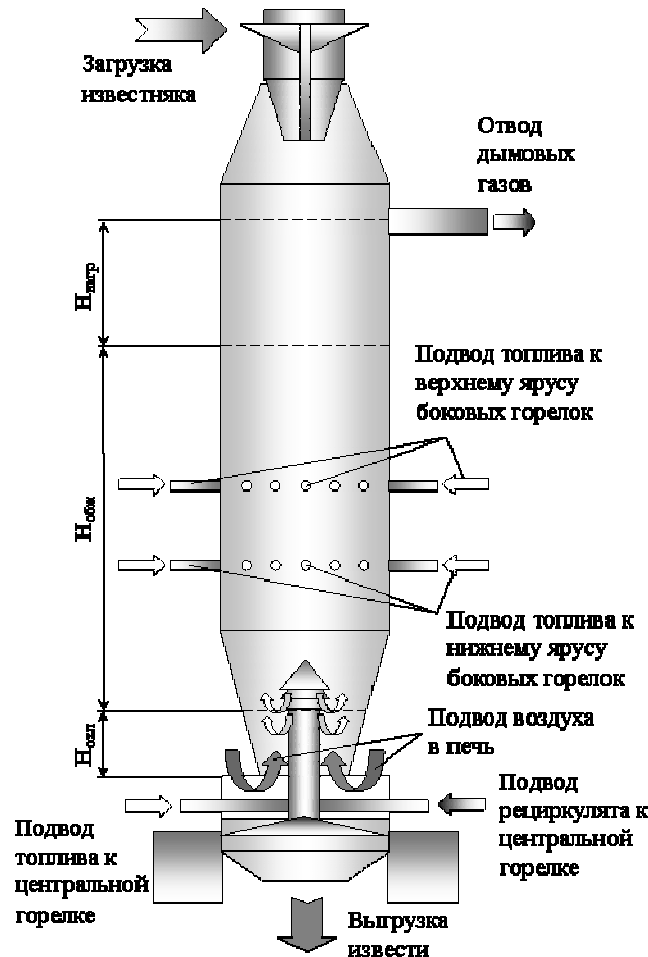


Рисунок 1 – Схема шахтной известково-обжиговой печи на газообразном топливе

$H_{нагр}$  – высота зоны нагрева известняка;

$H_{обж}$  – высота зоны обжига;

$H_{охл}$  – высота зоны охлаждения извести

Основой для проведения исследований явилась математическая модель работы печи [3], учитывающая газодинамику, конвективный и диффузионный перенос в газовой фазе, теплообмен в слое и куске материала, а также неполное горение топлива. С использованием модели выполнено параметрическое исследование влияния режимных параметров на показатели работы печи [5]. В соответствии с результатами расчетов [5] была получена регрессионная энергетическая характеристика печи, выражающая связь расхода топлива  $B_{\text{пр}}$  с основными режимными параметрами работы печи (расходом топлива  $B_{\text{пр}}^{\text{II}}$ , воздуха  $V_{\text{в}}^{\text{II}}$  и рециркулята  $V_{\text{р}}$  на центральную горелку, расхода воздуха в основание печи  $V_{\text{в}}$ ) и заданными технологическими показателями (суточной загрузки печи по известняку  $G$  и степени обжига материала  $\sigma$ ):

$$\begin{aligned}
 B_{\text{пр}} &= f(B_{\text{пр}}^{\text{II}}, V_{\text{рец}}, V_{\text{в}}, V_{\text{в}}^{\text{II}}, G, \sigma) = \\
 &= -4442 - 0,781 \cdot B_{\text{пр}}^{\text{II}} + 0,344 \cdot V_{\text{в}} + 13,1 \cdot G + 5095,54 \cdot \sigma - 0,06 \cdot V_{\text{в}}^{\text{II}} + \\
 &+ 10^{-3} \cdot B_{\text{пр}}^{\text{II}^2} + 3 \cdot 10^{-5} \cdot V_{\text{рец}}^2 - 6,15 \cdot 10^{-4} \cdot G \cdot V_{\text{в}} + 5,752 \cdot G \cdot \sigma - \\
 &- 1,44 \cdot 10^{-4} \cdot B_{\text{пр}}^{\text{II}} \cdot V_{\text{рец}} - 0,463 \cdot V_{\text{в}} \cdot \sigma + 1,94 \cdot 10^{-5} \cdot (V_{\text{в}} \cdot \sigma)^2.
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

Коэффициент детерминации  $R^2$  уравнения (1) составил 0,95. Оценка значимости коэффициентов пропорциональности выполнялась с использованием критерия Стьюдента. Полученная энергетическая характеристика использована в качестве оптимизационной модели, а в качестве критерия оптимальности принят расход природного газа  $B_{\text{пр}}$ .

Кроме этого, согласно эксплуатационными и проектными показателями работы печи [4] в общую постановку задачи оптимизации расхода топлива был включен ряд ограничений:

- на диапазон изменения коэффициента расхода воздуха на печь  $\alpha_{\text{п}}$ :

$$0,8 \leq \alpha_{\text{п}} \leq 2; \tag{2}$$

- на соотношение расходов природного газа на центральную горелку и общего расхода на печь:

$$0,2 \leq \frac{B_{\text{пр}}^{\text{II}}}{B_{\text{пр}}} \leq 0,8; \tag{3}$$

- на диапазон изменения расхода рециркулята на центральную горелку:

$$0 \leq V_{\text{р}} \leq 2500, \text{ м}^3/\text{ч}; \tag{4}$$

- на диапазон изменения коэффициента расхода воздуха на центральную горелку  $\alpha_{\text{п}}$ :

$$0 \leq \alpha_{\text{п}} \leq 0,25. \tag{5}$$

Решение задачи (1)–(5) выполнено методом Ньютона. Полученные результаты представлены в табл. 1 и на рис. 2–3.

Из приведенных данных следует, что для печи данной конструкции в первую очередь необходима организация оптимального режима работы центральной горелки. В исследованном диапазоне  $G = 270 \div 370$  т/сут и  $\sigma = 75 \div 90$  % рекомендуемые расходы газов в центральную горелку составляют:  $B_{\text{пр}}^{\text{II}} = 410 \div 430$  м<sup>3</sup>/ч;  $V_{\text{рец}} = 730 \div 780$  м<sup>3</sup>/ч;  $V_{\text{в}}^{\text{II}} = 980 \div 1040$  м<sup>3</sup>/ч (рис. 2–3). В дальнейшем, для обеспечения требуемого качества извести  $\sigma$  в зависимости от загрузки печи  $G$  следует управлять расходами топлива на периферийные горелки  $B_{\text{пр}}^{\text{б}}$  и воздуха в основание печи  $V_{\text{в}}$ .

Как видно из рис. 2, с ростом производительности печи при заданном качестве извести расходы топлива и воздуха на печь увеличиваются. В то же время при увеличении степени обжига, напротив необходимо снижать подачу воздуха в основание печи при повышении расхода топлива. Последняя взаимосвязь поясняется тем, что снижение скорости спутного потока воздуха приводит к раскрытию диффузионного факела в слое кускового материала и соответственно способствует расширению зоны обжига по сечению печи.

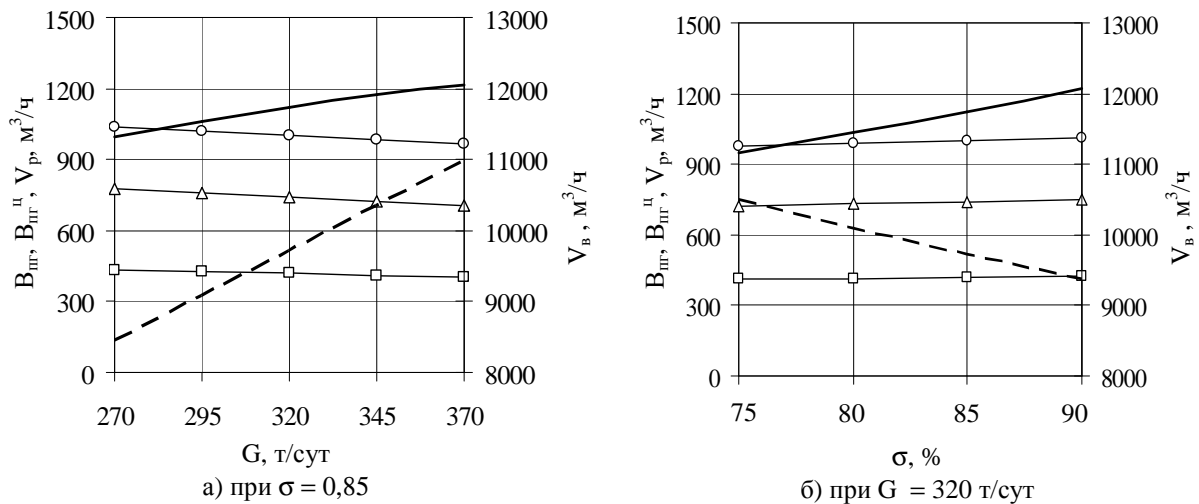


Рисунок 2 – Зависимость оптимальных режимных параметров работы печи от загрузки по известняку и степени обжига готового продукта

- расход природного газа на печь  $V_{пг}$
- расход воздуха в основание печи  $V_v$
- расход природного газа на центральную горелку  $V_{пг}^{II}$
- △— расход рециркулята на центральную горелку  $V_p$
- расход воздуха на центральную горелку  $V_v^{II}$

На рис. 3 показано изменение удельного расхода условного топлива на тонну активной извести в оптимальных режимах работы печи. Согласно представленным данным, удельный расход топлива на тонну активной извести тем меньше, чем выше производительность печи и ниже требования к качеству готового продукта.

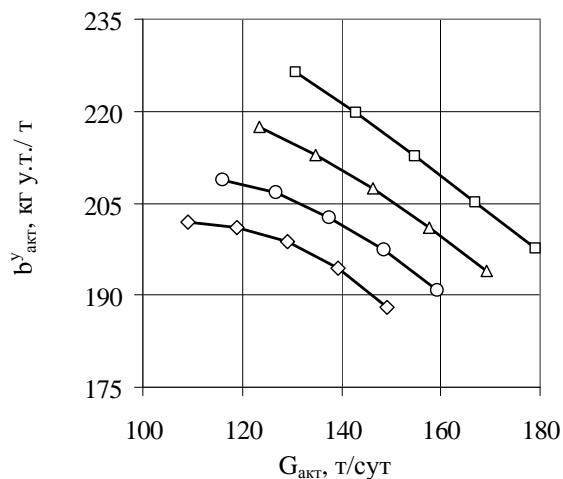


Рисунок 3 – Зависимость удельного расхода условного топлива от производительности печи по активной извести в оптимальных режимах работы

- $\sigma = 90 \%$
- △—  $\sigma = 85 \%$
- $\sigma = 80 \%$
- ◇—  $\sigma = 75 \%$



Таблица 1 – Сравнительная характеристика основных показателей работы печи

Параметр	Режим работы печи	
	Базовый	Оптимальный
Общий расход топлива $V_{\text{пг}}$ , м <sup>3</sup> /ч	1100	1100
Расход топлива на центральную горелку $V_{\text{пг}}^{\text{ц}}$ , м <sup>3</sup> /ч	700	420
Расход воздуха на центральную горелку $V_{\text{в}}^{\text{ц}}$ , м <sup>3</sup> /ч	0	1000
Расход рециркулята на центральную горелку $V_{\text{р}}^{\text{ц}}$ , м <sup>3</sup> /ч	1250	750
Расход воздуха в основание печи $V_{\text{в}}$ , м <sup>3</sup> /ч	12000	9500
Загрузка печи по известняку $G$ , т/сут	300	314
Степень обжига известняка $\sigma$ , %	74,3	85,0
Общее содержание оксидов $(\text{CaO}+\text{MgO})_{\text{изв}}^{\text{общ}}$ в извести, %	78,8	84,5
Выход извести $G_{\text{изв}}$ , т/сут	205	200
Выход активной извести $G_{\text{изв}}^{\text{акт}}$ , т/сут	120	144
Удельный расход топлива на тонну активной извести $b_{\text{г}}^{\text{акт}}$ , кг уг/т	248	207

На основании решения задачи оптимизации для внедрения предложен энергоэффективный режим работы печи при  $G = 314$  т/сут  $\sigma = 85$  %, отвечающий проектным показателям по производительности и качеству (табл. 1). Сравнительный анализ фактического режима эксплуатации [6] и рекомендованного (табл. 1) показывает, что в новом режиме удельный расход топлива на тонну активной извести снижается на 17 %.

### Выводы

1. На основе результатов параметрического исследования работы шахтной противоточной известково-обжиговой печи, решена задача оптимизации ее режимных параметров (распределения топлива, воздуха и рециркулята между центральной и периферийными горелками), обеспечивающая минимальные затраты природного газа при производстве извести.

2. Предложен энергоэффективный режим работы шахтной печи, обеспечивающий снижение удельного расхода природного газа на 17 % при заданных значениях качества готового продукта и производительности агрегата. Показано, что на всех режимах работы целесообразна настройка режима центральной горелки: расход топлива 410÷430 м<sup>3</sup>/ч; расход рециркулята 730÷780 м<sup>3</sup>/ч; расход воздуха 980÷1040 м<sup>3</sup>/ч. При этом, управление качеством извести в зависимости от производительности осуществляется изменением расхода топлива на периферийные горелки и расхода воздуха в основание печи.

### Литература

1. Мадисон В.В., Рязанов В.Т., Гордон Я.М. Проблемы и пути повышения эффективности сжигания топлива в шахтных известковорбжиговых печах // Металлургическая теплотехника. – Днепрпетровск: НМетАУ. – 2002. – Т.6. – С. 89–99.
2. Лисиенко В.Г., Щелков Я.М., Ладыгичев М.Г. Топливо. Рациональное сжигание, управление и технологическое использование: Справочное издание: В 3-х книгах. Книга 2/ Под ред. В.Г. Лисиенко. – М.: Теплотехник, 2004. – 832 с.
3. Форись С.М., Федоров С.С., Губинский М.В.. Математическое моделирование шахтных известково-обжиговых печей // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – 2008. – Т.2. – С. 98–104.

4. Монастырев А.В. Производство извести. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 1986. – 192 с.

5. Форись С.М., Федоров С.С., Федоров О.Г. Результати досліджень теплової роботи шахтної вапняно-випалювальної печі на природному газі //Металургійна теплотехніка: Збірник наукових праць Національної металургійної академії України. – Дніпропетровськ: «Нова ідеологія», 2008. – С. 297–306.

6. Форись С.Н., Федоров С.С., Федоров О.Г. Разработка и реализация рациональных режимов работы шахтных известково-обжиговых печей// Металургійна теплотехніка. Збірник наукових праць Національної металургійної академії України. – Дніпропетровськ: «ПП Грек О.С.», 2007. – С. 278–287.

Bibliography (transliterated)

1. Madison V.V., Rjazanov V.T., Gordon Ja.M. Problemy i puti povysheniya jeffektivnosti szhiganiya topliva v shahtnyh izvestkovorbzhigovyh pechah Metallurgicheskaja teplotehnika. – Dneepropetrovsk: NMetAU. – 2002. – Т.6. – р. 89–99.

2. Lisienko V.G., Shhelkov Ja.M., Ladygichev M.G. Toplivo. Racional'noe szhiganie, upravlenie i tehnologicheskoe ispol'zovanie: Spravochnoe izdanie: V 3-h knigah. Kniga 2/ Pod red. V.G. Lisienko. – М.: Тепло-техник, 2004. – 832 p.

3. Foris' S.M., Fedorov S.S., Gubinskij M.V.. Matematicheskoe modelirovanie shahtnyh iz-vestkovo-obzhigovyh pechej Sistemni tehnologii. Regional'nij mizhvuzivs'kij zbirnik naukovih prac'. – 2008. – Т.2. – р. 98–104.

4. Monastyrev A.V. Proizvodstvo izvesti. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Vysshaja shkola, 1986. – 192 p.

5. Foris' S.M., Fedorov S.S., Fedorov O.G. Rezul'tati doslidzhen' teplovoi roboti shahtnoi vapnjano-vipaljuval'noi pechi na prirodnomu gazi Metallurgijna teplotehnika: Zbirnik naukovih prac' Nacional'noi metalurgijnoi akademii Ukraini. – Dnipropetrovs'k: «Nova ideologija», 2008. – р. 297–306.

6. Foris' S.N., Fedorov S.S., Fedorov O.G. Razrabotka i realizacija racional'nyh rezhimov raboty shahtnyh izvestkovo-obzhigovyh pechej Metallurgijna teplotehnika. Zbirnik naukovih prac' Nacional'noi metalurgijnoi akademii Ukraini. – Dnipropetrovs'k: «PP Grek O.S.», 2007. – р. 278–287.

УДК 66.041.44: 502.172 (043)

Форись С.М., Губинський М.В., Федоров С.С., Федоров О.Г., Ковпак Г.Г.

**РОЗРОБКА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИХ РЕЖИМІВ РОБОТИ ШАХТНИХ ПРОТИТОЧНИХ  
ВАПНЯНО-ВИПАЛЮВАЛЬНИХ ПЕЧЕЙ**

Вирішено задачу оптимізації режимів роботи шахтної протиточної вапняно-випалювальної печі з метою скорочення витрати природного газу. В якості керуємих режимних параметрів розглянуто витрати палива, повітря та рециркуляту. В якості незалежних технологічних параметрів – завантаження печі вапняком та ступінь випалу матеріалу. Очікуване зменшення питомої витрати палива складає 17 %.

Foris S., Gubinsky M., Fedorov S., Fedorov O., Kovpak A.

**THE EFFECTIVE WORKING CONDITIONS DEVELOPMENT  
OF SHAFT COUNTER-FLOW LIME-KILNING FURNACE**

For reduction of natural gas consumption the working conditions optimization problem of shaft counter-flow lime-kilning furnace is solved. The fuel, air and recycling gas consumptions were examined as controllable working conditions. The furnace-charge with limestone and material burning degree – as independent manufacturing parameters. The expected fuel rate economy made up 17 %.



**ДОСЛІДЖЕННЯ ТА АНАЛІЗ ДЕЯКИХ СХЕМ ГТУ ТА ПГУ  
ЗА ДОПОМОГОЮ СУЧАСНИХ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ**

**Актуальність та постановка задачі.** Перспективний напрям розвитку енергетики пов'язаний з газотурбінними (ГТУ) та парогазовими (ПГУ) енергетичними установками теплових електричних станцій [1].

Такі установки мають ряд переваг у порівнянні з іншими тепловими двигунами для виробництва електричної і теплової енергії. ГТУ характеризуються високим рівнем маневреності, що є важливою характеристикою для пікових електрогенеруючих установок, такі двигуни займають відносно невеликі розміри і мають відносно низькі питомі капіталовкладення. Сучасні ПГУ характеризуються низьким рівнем шкідливих викидів в атмосферу, відносно нижчими у порівнянні з ПТУ питомими витратами охолоджуючої води, нижчим рівнем теплового забруднення тощо [1].

Шляхи підвищення ефективності таких установок, а особливо ПГУ, загалом до кінця ще не досліджені і представляють собою складну багатопараметричну проблему [2, 3, 4], яку в багатьох випадках можна вирішити за допомогою математичного моделювання.

Завдяки широкому впровадженню потужних ПЕОМ та зручних для використання програмних пакетів (Mathcad, Matlab, Mathematica, Maple і ін.), моделювання складних процесів, що відбуваються на об'єктах теплоенергетики, стає дедалі поширеним і можливим для широкого кола спеціалістів.

Авторитетне в області інформаційних технологій (ІТ) видання PC World ([www.pcworld.com](http://www.pcworld.com)) опублікувало список 10 «ІТ-переворотів» – подій, які серйозно змінять життя користувачів комп'ютерів протягом найближчого часу. На першому місці стоїть розвиток так званих «хмарних обчислень» («cloud computing») – надання видалених обчислювальних потужностей, дискового простору і каналів зв'язку замовнику. На використання «хмарних обчислень» користувачів підштовхне, крім іншого, висока вартість ліцензій програм на окремі робочі станції, оренди приміщень, електроенергії та боротьба з комп'ютерним піратством. Під «хмарами» розуміються обчислювальні центри, які є на порядок потужнішими за серйозні інфраструктури досвідчених в ІТ організацій. Замість фізичних серверів замовникам виділяються віртуальні сервери, що будуть розгорнуті на розподіленій мережі комп'ютерів промислової потужності. Приклади «хмар»: Amazon Web Services, McAfee Cloud Security.

Фахівцями Московського енергетичного інституту за участю науковців інших організацій створені «хмарні розрахункові сервери», на які можна вийти за адресами: <http://twf.mpei.ac.ru/ochkov/WSPHB> та <http://twf.mpei.ac.ru/ТТНВ/2/ThermCycleMCS.html>, що будуть корисні усім тим, кому необхідні властивості робочих тіл і теплоносіїв енергетики, а також розрахунки і візуалізація процесів і циклів теплоенергетичних установок.

Результати досліджень та аналіз різних схем ГТУ та ПГУ можна знайти у спеціалізованій літературі (монографії, дисертації, посібники, статті тощо), яка не завжди є доступною, і яка, враховуючи багатofакторний вплив різних параметрів на роботу таких установок, дає не завжди повну картину про залежність показників їх роботи від впливаючих факторів.

**Мета дослідження.** Отже, дана робота стосується дослідженню та аналізу схем деяких ГТУ та ПГУ в інтерактивному режимі за допомогою сайту <http://twf.mpei.ac.ru/ТТНВ/2/ThermCycleMCS.html> на основі інформаційних технологій.

Для прикладу розглянемо результати розрахунків простої ГТУ відкритого типу, що працює за циклом Брайтона. З метою порівняння отриманих результатів розрахунку з іншими джерелами візьмемо ГТУ типу V64.2 (Siemens). Методика підготовки розрахунку для публікації його на сайті <http://twf.mpei.ac.ru/ТТНВ/2/ThermCycleMCS.htm> в даній статті не розглядається. Вкажемо лише, що цей розрахунок створюється за технологією Mathcad Calculation Server [5, 6, 7].

Розрахунок ведеться без врахування охолодження газової турбіни, хоча, враховуючи сьогоденню тенденцію підвищення температури газів перед газовою турбіною, це необхідно враховувати. Розрахунки процесу розширення газів у турбіні з охолодженням її деталей представляє собою окрему складну задачу. Робота над створенням розрахунків ГТУ з врахуванням охолодження газової турбіни зараз ведеться.

Початкові дані з розрахунку вибраної для прикладу ГТУ наведені на рис. 1. Бачимо, що загалом кількість вихідних даних містить дев'ятнадцять одиниць, числові дані яких знаходяться у спеціальних комірках (технологія Mathcad Calculation Server), і значення яких можна змінювати в залежності від потреб користувача. Внизу розміщена «жива» клавіша Recalculate, яка натискається для виконання перерахунку у відповідності з новими вихідними даними.

Безпосередньо сам розрахунок ведеться із використання рекомендації, формул та рівнянь, які наведені в [2].

Для визначення термодинамічних параметрів робочих тіл використовується сертифікована програма WaterSteamPro ([www.wsp.ru](http://www.wsp.ru)), яка розроблена фахівцями Московського енергетичного інституту.

**Расчет ГТУ типа V64.2 (Siemens)**

**Исходные данные**

Массовый расход входящего воздуха  $G_{вх}$ , kg/sec  Температура входящего воздуха  $t_{вх}$ , °C

Относительная влажность входящего воздуха  $\phi_{вх}$ , %  Вн. относительный КПД компрессора  $\eta_{oi\_к}$ , %

Давление входящего воздуха  $p_{вх}$ , МПа  Внутренний относительный КПД газ. турбины  $\eta_{oi\_т}$ , %

Повышение давления в компрессоре  $\pi_к$   Температура на входе в газовую турбину  $t_3$ , °C

Низшая теплота сгор. топл.  $Q_{н\_р}$ , МДж/кг  Состав топл.  $X_{CH4}$ , %

Температура вход. топл.  $t_f$ , °C  Давление вход. топл.  $p_T$ , МПа

Температура определения низшей теплоты сгор. топл.  $t_{Qн\_р}$ , °C

Избыточное давл. топлива перед камерой сгор.  $\Delta p_{т\_к\_с}$ , МПа

Вн. относител. КПД топл. компрессора  $\eta_{oi\_тк}$ , %  Потери давл. в камере сгор.  $\delta p_{к\_с}$ , %

Коэффициент использования теплоты камеры сгорания  $\eta_{к\_с}$ , %  Потери давл. уходящих газов за ГТ  $\delta p_{т}$ , %

Механический КПД  $\eta_{м}$ , %

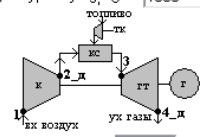


Рисунок 1 – Блок вихідних даних, підготовлених за технологією Mathcad Calculation Server, для розрахунку ГТУ

Результати розрахунку взятої для прикладу ГТУ наведені у таблиці 1. У таблиці 1 наведені параметри цієї ж ГТУ взяті з [2]. Бачимо, що похибка між параметрами, отриманими авторами статті та наведеними в [2] в більшості випадків не перевищує 0,50 %. В деяких випадках ця похибка сягає 2,00 %.

Отже, можна зробити висновок, що розрахунок даної ГТУ за допомогою серверу <http://twm.mpei.ac.ru/ТТНВ/2/ThermCycleMCS.htm>, є досить точним.

Таблиця 1 – Порівняння літературних даних [2] ГТУ типу V64.2 (Siemens) з даними, отриманими розрахунком авторів статті

Показник		Перед компресором	Перед камерою згорання	Перед газовою турбіною	На виході із газової турбіни
Тиск, МПа	Згідно [2]	0,1013	1,0686	1,042	0,1043
	Автори статті	0,1013	1,0686	1,042	0,1043
	<b>Похибка, %</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>
Температура, °C	Згідно [2]	15	323,6	1050	551,8
	Автори статті	15	321,98	1050	551,98
	<b>Похибка, %</b>	<b>0,00</b>	<b>0,50</b>	<b>0,00</b>	<b>0,03</b>
Надлишок повітря	Згідно [2]	–	–	3,21	3,21
	Автори статті	–	–	3,22	3,22
	<b>Похибка, %</b>	–	–	<b>0,30</b>	<b>0,30</b>
Масова витрата робочого тіла, кг/с	Згідно [2]	1	1	1,01793	1,01793
	Автори статті	1	1	1,01793	1,01793
	<b>Похибка, %</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>
Потужність осьового компресора, кВт	Згідно [2]	317,545			
	Автори статті	315,798			
	<b>Похибка, %</b>	<b>0,55</b>			
Потужність газової турбіни, кВт	Згідно [2]	615,094			
	Автори статті	615,396			
	<b>Похибка, %</b>	<b>0,05</b>			
Потужність електрогенератора ГТУ, кВт	Згідно [2]	294,547			
	Автори статті	299,598			
	<b>Похибка, %</b>	<b>1,70</b>			
Теплота, що підводиться у камері згорання, кВт	Згідно [2]	897,328			
	Автори статті	894,624			
	<b>Похибка, %</b>	<b>0,30</b>			
ККД виробництва електроенергії, %	Згідно [2]	32,827			
	Автори статті	33,489			
	<b>Похибка, %</b>	<b>2,00</b>			

Маючи доступ до Інтернет, в залежності від своїх потреб, користувач, ввівши свої вхідні дані (рис. 1), може за допомогою сайту <http://twf.mpei.ac.ru/ТТНВ/2/ThermCycleMCS.html> виконати в інтерактивному режимі розрахунок та дослідження типової простої ГТУ відкритого типу. В цьому, зокрема, визначається цінність розрахунків такого роду (розрахунків за допомогою мережі Інтернет).

Зробимо дослідження деяких факторів, що можуть впливати на підвищення ефективності бінарної ПГУ.

Збільшення ККД бінарної ПГУ можна досягти, зокрема, шляхом багатоступеневого підводу теплоти у газовому циклі (проміжного перегріву газів), стисненням повітря у компресорі до максимально можливих тисків та використанням зверхкритичного початкового тиску пари [3].

Для прикладу візьмемо ПГУ з одноконтурним котлом-утилізатором (КУ). Дослідимо і проаналізуємо вплив проміжного перегріву газів у ГТУ на ККД ПГУ. Розглянемо три схеми ПГУ: ПГУ з одноконтурним КУ без проміжного перегріву газів; ПГУ з одноконтурним КУ та проміжним перегрівом газів; ПГУ з одноконтурним КУ та проміжним перегрівом газів і пари. Схеми таких установок наведені на рис. 2...4. В склад ПГУ входить ГТУ типу V64.2 (Siemens). Для можливості порівняння різних варіантів ПГУ вихідні дані приймалися однаковими у трьох схемах. Блок вихідних даних, підготовлений за технологією Mathcad Calculation Server, наведений на рис. 2. Вихідні дані містять понад 30 величин. Критичні температурні напори в КУ приймалися у всіх схемах однаковими і рівними 10 °С, недогрів води до кипіння – приймався рівним 8 °С. У схемах з проміжним перегрівом газів у ГТУ приймався степінь розширення газів у першій секції газової турбіни рівним 2,8. Тиск та температура пари на виході із проміжного пароперегрівника у третій схемі (рис. 4) приймалися відповідно 3,24 МПа та 525 °С.

**Расчет ПГУ с одноконтурным котлом-утилизатором**

**Данные для расчета ГТУ**

Массовый расход входящего воздуха  $G_{вх}$ , kg/sec  Температура входящего воздуха  $t_{вх}$ , °C   
 Относительная влажность входящего воздуха  $\phi_{вх}$ , %  Вн. относительный КПД компрессора  $\eta_{oi\_к}$ , %   
 Давление входящего воздуха  $p_{вх}$ , МПа  Внутренний относительный КПД газ. турбины  $\eta_{oi\_гт}$ , %   
 Повышение давления в компрессоре  $\pi_k$   Температура на входе в газовую турбину  $t_{згту}$ , °C   
 Низшая теплота сгор. топл.  $Q_{н\_р}$ , МДж/кг  Состав топл.  $X_{CH4}$ , %  Температура вход. топл.  $t_t$ , °C   
 Температура определения низшей теплоты сгор. топл.  $t_{Qн\_р}$ , °C  Давление вход. топл.  $p_t$ , МПа   
 Избыточное давл. топлива перед камерой сгор.  $\Delta p_{т\_к\_с}$ , МПа  Потери давл. в камере сгор.  $\delta p_{к\_с}$ , %   
 Вн. относител. КПД топл. компрессора  $\eta_{oi\_тк}$ , %  Коэф. использования теплоты камеры сгорания  $\eta_{к\_с}$ , %   
 Потери давл. уходящих газов в КУ  $\delta p_{ку}$ , %  Механический КПД ГТУ  $\eta_{м\_гту}$ , %

**Данные для расчета ПГУ**

Давление пара на выходе из КУ,  $p_{ку\_вых}$ , МПа   
 Температура пара на выходе из КУ,  $t_{ку\_вых}$ , °C   
 Давление пара в отборе на деаэрактор,  $p_d$ , МПа   
 Давление в конденсаторе,  $p_{2пту}$ , кПа   
 Потери давления пара между КУ и ПТ,  $\delta p_p$ , %   
 Температурный напор на входе газов в экономайзер КУ,  $\delta t_{зк\_вх}$ , °C   
 Температура конденсата на входе в ГПК,  $t_{гпк\_вх}$ , °C   
 Вн. относит. КПД пит. насоса,  $\eta_{oi\_н}$ , %   
 КПД электрогенератора ПТУ  $\eta_{г\_пту}$ , %   
 Механический КПД ПТУ  $\eta_{м\_пту}$ , %   
 Вн. относит. КПД ЧВД ПТ,  $\eta_{oi\_чвд}$ , %   
 Вн. относит. КПД ЧНД ПТ,  $\eta_{oi\_чнд}$ , %

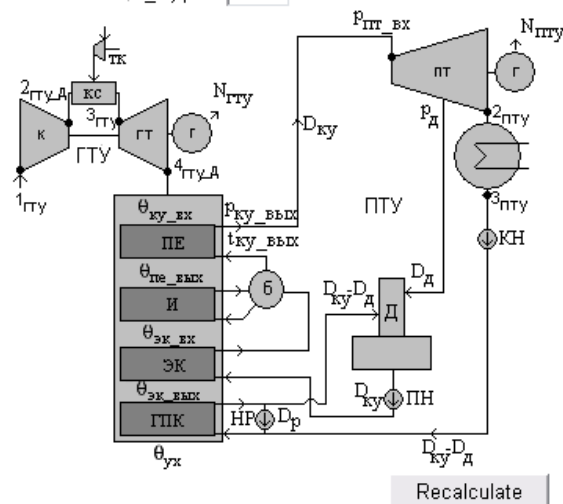


Рисунок 2 – Принципова схема та блок вихідних даних для розрахунку ПГУ з одноконтурним КУ без проміжного перегріву газів

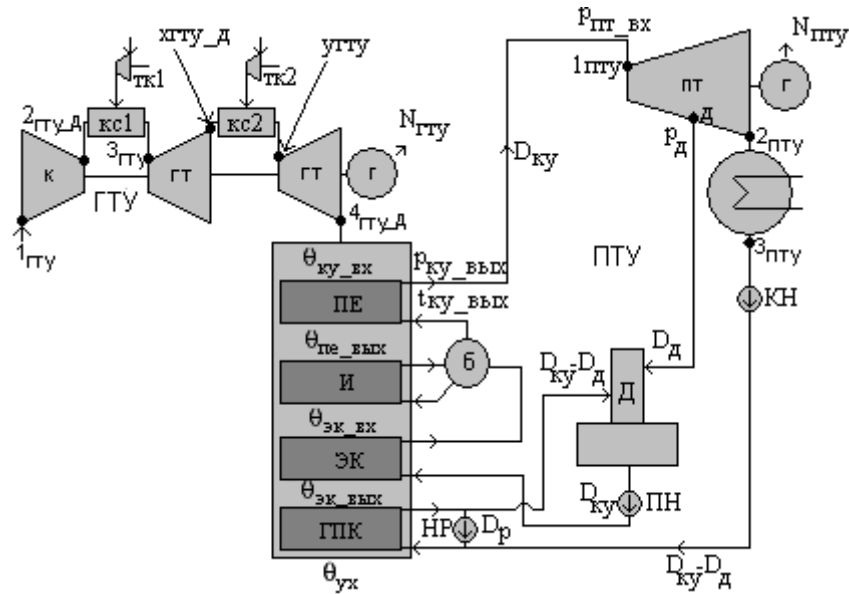


Рисунок 3 – Принципова схема ПГУ з одноконтурним КУ та проміжним перегрівом газів

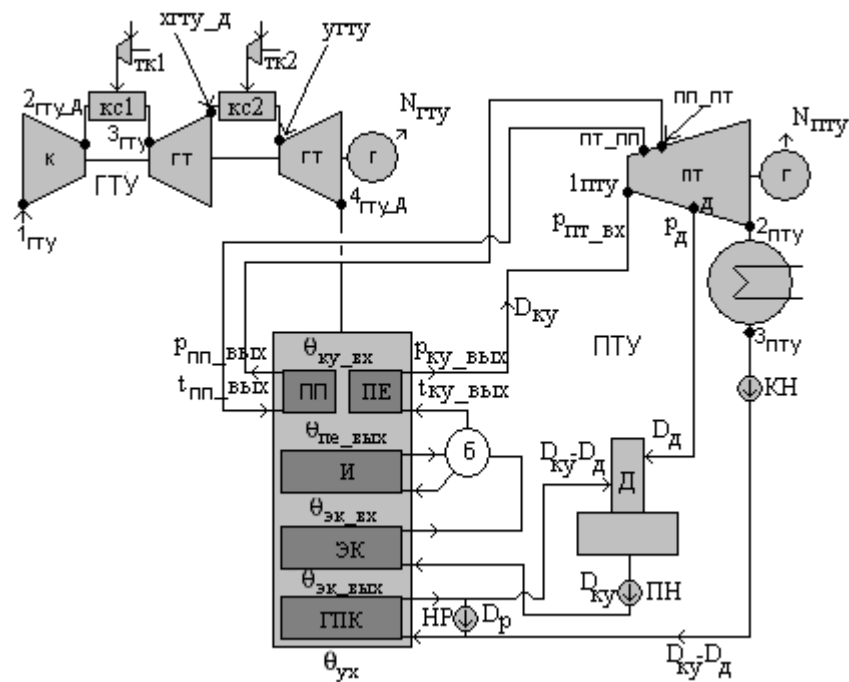


Рисунок 4 – Принципова схема ПГУ з одноконтурним КУ та проміжним перегрівом газів і пари

Результати визначення ККД ПГУ з виробництва електричної енергії для трьох схем наведені на рис. 5, з якого можна зробити висновок, що для вихідних даних, які наведені на рис. 2, та при значенні ступеня розширення газів у першій секції газової турбіни рівному 2,8, проміжний перегрів газів у ГТУ дозволяє підвищити ККД ПГУ з одноконтурним КУ майже на 4 % (в абсолютних одиницях) у порівнянні з ПГУ без проміжного перегріву газів. На основі цього можна стверджувати про доцільність подальшого дослідження влаштування багатоступеневого підводу теплоти у ГТУ як складової ПГУ. При влаштуванні у ПГУ з проміжним перегрівом газів додатково перегріву пари має місце подальше підвищення ККД (хоча і незначне), а також підвищення ступеня сухості – до 0,945, що значно покращує експлуатаційні характеристики парової турбіни. Варто зауважити, що у трьох схемах внутрішні відносні ККД парової турбіни як високого тиску так і низького тиску приймалися постійними, хоча враховуючи відносно високу

вологість пари ( $1-0,876=0,124$ ) за останніми лопатками парової турбіни у схемах 1 та 2 (рис. 2 та 3), можна стверджувати, що ККД цих схем будуть іще нижчими ніж ті, які наведена рис. 5.

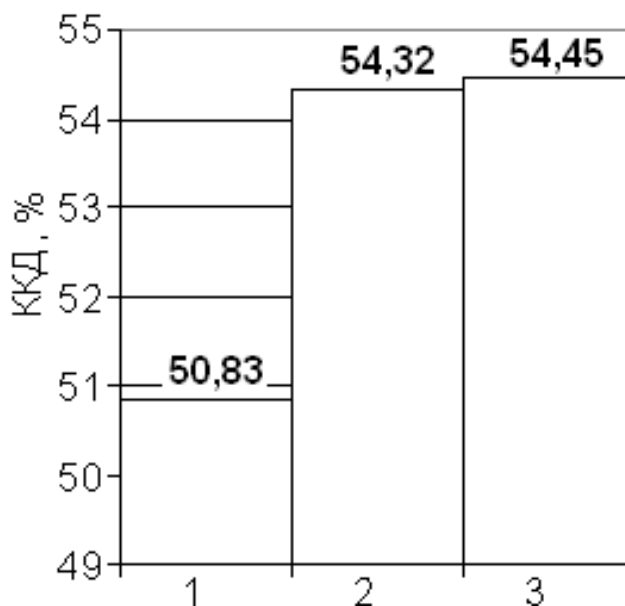


Рисунок 5 – Вплив проміжного перегріву газів у газовій турбіні на ККД ПГУ з виробництва електричної енергії:

- 1 – схема на рис. 2, степінь сухості на виході із парової турбіни  $x = 0,876$ ; 2 – схема на рис. 3,  $x = 0,876$ ;  
3 – схема на рис. 4,  $x = 0,945$

Необхідно зазначити, що хід самого розрахунку розглянутих схем ГТУ та ПГУ користувач може прослідкувати безпосередньо на сайті <http://twt.mpei.ac.ru/ТТНВ/2/ThermCycleMCS.html>. Розрахунок виконаний у програмі Mathcad, яка є досить зрозумілою, оскільки використовує позначення та символи математики. В залежності від потреб, до розрахунку можна додати графічну ілюстрацію. Для прикладу на рис. 6 наведена теплова діаграма КУ в області випарника, економайзера та газового підігрівника конденсату (схема ПГУ зображена на рис. 4), а на рис. 7 – процес розширення пари у паровій турбіні, а також перегрів пари у проміжному пароперегрівнику (схема ПГУ зображена на рис. 4), які автоматично будуються на сайті <http://twt.mpei.ac.ru/ТТНВ/2/ThermCycleMCS.html> у відповідності з введеними вихідними даними.

Виходячи з вищенаведеного можна зробити такі висновки:

1. Використання математичного пакету Mathcad, мережним публікатором якого є Mathcad Calculation Server, дозволяє проводити достатньо просто детальні розрахунки циклів теплових двигунів, не вдаючись до допомоги сторонніх програмістів.

2. Апробація розрахунків та дослідження типових теплових двигунів в залежності від вихідних даних користувача за допомогою створеного таким чином сайту <http://twt.mpei.ac.ru/ТТНВ/2/ThermCycleMCS.html> показує досить високу точність та відповідність іншим джерелам.

3. Виконане за допомогою сайту <http://twt.mpei.ac.ru/ТТНВ/2/ThermCycleMCS.html> дослідження впливу проміжного перегріву газів у ГТУ на ККД типової ПГУ з одноконтурним КУ показало, що двоступеневий підвід теплоти у ГТУ дозволяє підвищити ККД такої ПГУ майже на 4 % (в абсолютних одиницях) у порівнянні з ПГУ без проміжного перегріву газів. Причому додаткове влаштування проміжного перегріву пари у паровій турбіні такої ПГУ дозволяє забезпечити допустимі значення вологості пари за останніми лопатками парової турбіни.

4. Сайт <http://twt.mpei.ac.ru/ТТНВ/2/ThermCycleMCS.html> поступово розширюється, розрахунки коректуються та створюються нові.



Проверка минимального температурного напора в области экономайзера  
 $\Delta T_{min} = \text{if}(\Delta_{min} \geq 10\text{K}, \Delta_{min}, \text{"Температурный напор в ЭК меньше за 10K"}) = 10.295\text{K}$

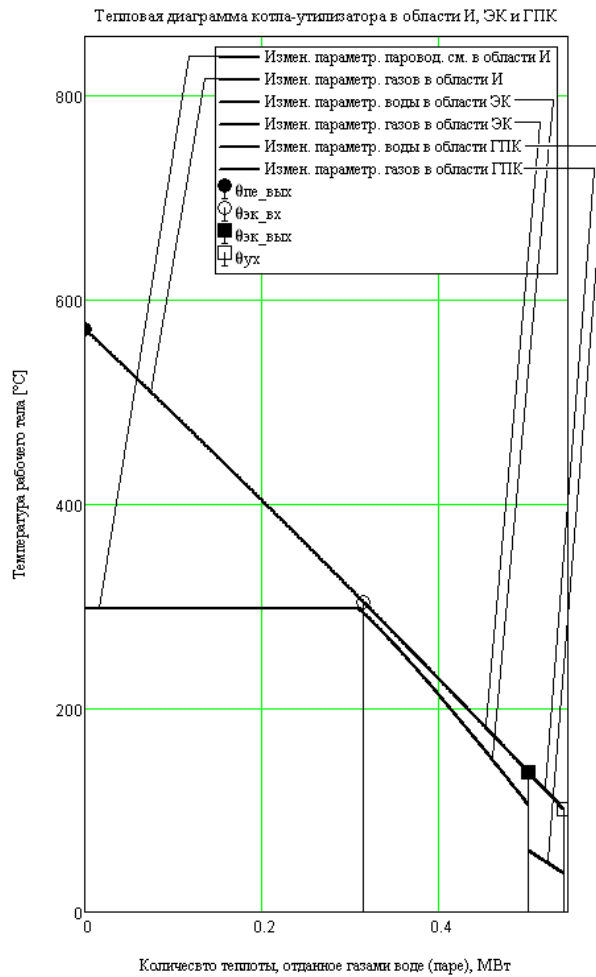


Рисунок 6 – Теплова діаграма КУ в області випарника, економайзера та газового підігрівника конденсату (схема ПГУ зображена на рис. 4)

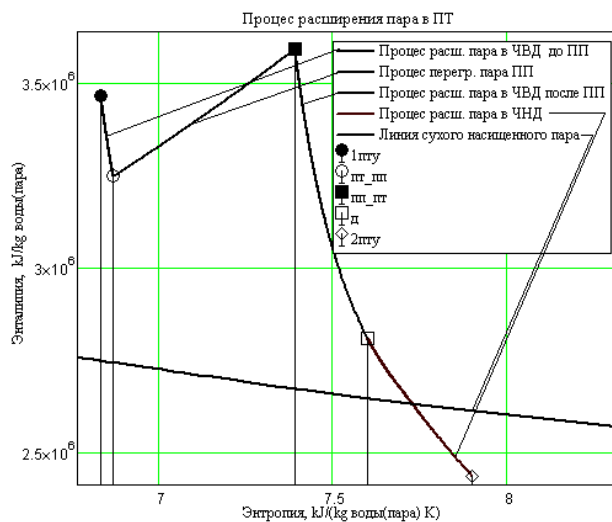


Рисунок 7 – Процес розширення пари у паровій діаграмі а також перегрів пари у проміжному пароперегрівнику (схема ПГУ зображена на рис. 4)

## Література

1. Лейзерович А.Ш. Одновальные парогазовые установки // Теплоэнергетика, №12, 2000, с. 69–73.
2. Цанев С.В. Газотурбинные и парогазовые установки тепловых электростанций: учебное пособие для вузов / С.В. Цанев, В.Д. Буров, А.Н. Ремезов; под ред. С.В. Цанева. – 2-е изд., стереот. – М.: Издательский дом МЭИ, 2006. – 584 с.:ил.
3. Андрищенко А.И. Основы термодинамики циклов теплоэнергетических установок. – М.: Высшая школа, 1985. – 320 с.
4. Березинец А.П., Васильев М.К., Костин Ю.А. Анализ схем бинарных ПГУ на базе перспективной ГТУ // Теплоэнергетика, №5, 2001, с. 18–30.
5. Очков В.Ф., Александров А.А., Орлов К.А., Волощук В.А., Очков А.В. "Сетевые расчеты процессов и циклов теплоэнергетических установок" // Новое в российской электроэнергетике. №10. 2008. с. 5–27.
6. Очков В.Ф. Сетевые расчеты и диаграммы теплоэнергетических процессов // Промышленная энергетика, № 12 2008 г. с. 37–43
7. Очков В.Ф., Александров А.А., Волощук В.А., Дорохов Е.В., Орлов К.А. Интернет-расчеты термодинамических циклов // Теплоэнергетика, № 1, 2009 г. с. 77–80.

## Bibliography (transliterated)

1. Lejzerovich A.Sh. Odnoval'nye parogazovye ustanovki Teplojenergetika, #12, 2000, p. 69–73.
2. Canev S.V. Gazoturbinnye i parogazovye ustanovki teplovyh jelektrostantsij: uchebnoe po-sobie dlja vuzov S.V. Canev, V.D. Burov, A.N. Remezov; pod red. S.V. Caneva. – 2-e izd., stereot. – М.: Izdatel'skij dom MJeI, 2006. – 584 p.:il.
3. Andrijshhenko A.I. Osnovy termodinamiki ciklov teplojenergeticheskikh ustanovok. – М.: Vy-sshaja shkola, 1985. – 320 p.
4. Berezinec A.P., Vasil'ev M.K., Kostin Ju.A. Analiz shem binarnyh PGU na baze perspekti-vnoj GTU Teplojenergetika, #5, 2001, p. 18–30.
5. Ochkov V.F., Aleksandrov A.A., Orlov K.A., Voloshhuk V.A., Ochkov A.V. "Setevye raschety processov i ciklov teplojenergeticheskikh ustanovok" Novoe v rossijskoj jelektrojenergetike. #10. 2008. p. 5–27.
6. Ochkov V.F. Setevye raschety i diagrammy teplojenergeticheskikh processov Promyshlennaja jenergetika, # 12 2008 g. p. 37–43
7. Ochkov V.F., Aleksandrov A.A., Voloshhuk V.A., Dorohov E.V., Orlov K.A. Internet-raschety termodinamicheskikh ciklov Teplojenergetika, # 1, 2009 g. p. 77–80.

УДК 621.43.018.4

Волощук В.А., Очков В.Ф.

**ИССЛЕДОВАНИЕ И АНАЛИЗ НЕКОТОРЫХ СХЕМ ГТУ И ПГУ  
С ПОМОЩЬЮ СОВРЕМЕННЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ**

В статье приведена информация про сайт в Интернете, где можно вести расчет и исследование циклов тепловых двигателей в интерактивном режиме. На основе расчетов с помощью данного сайта показано, что устройство двухступенного подвода теплоты в ГТУ, позволяет повысить КПД ПГУ с одно-контурным котлом-утилизатором.

Voloshchuk V.A., Ochkov V.F.

**THE STUDY AND ANALYSIS OF SOME GTU AND SGU WITH USE  
OF MODERN INFORMATIC TECHNOLOGIES**

The article gives information about website where calculations and investigation of heat engines cycles can be carried out in an interactive mode. On the base of the calculations with the help of the given website it is shown that two-stage heat addition in Brayton Cycle Plant as a part of Gas-Steam Combined Cycle Plant allows to increase efficiency of Gas-Steam Combined Cycle Plant with single pressure heat recovery steam generator.

Оліярник Б.О., Євтушенко К.С., Бондарук А.Б., Глебов В.В., Казаков Б.М., Кононенко В.О.

**ІНТЕГРОВАНА ГАРАНТОЗДАТНА СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ ВОГНЕМ І НАВІГАЦІЇ  
САМОХІДНИХ РАКЕТНИХ ТА АРТИЛЕРІЙСЬКИХ СИСТЕМ  
НА КОЛІСНОМУ ТА ГУСЕНИЧНОМУ ШАСІ**

**Вступ. Постановка проблеми.** Зростаючі вимоги до скорочення часу реакції та відкриття вогню, у тому числі з невідготовлених вогневих позицій, забезпечення оперативності, стійкості, потайності управління, підтримки безперервної взаємодії у телекодовому та мовному форматі у ланці дивізіон – батарея – гармата спричинили оснащення бойових машин (БМ) та машин управління інтегрованими взаємодійними системами управління вогнем та навігації (СУВН), які повинні забезпечувати гарантоздатність виконання вогневого завдання комплексом рухомих наземних машин [1–8].

Сучасні ракетні та артилерійські системи (перспективні та такі, що модернізуються) оснащуються системою управління вогнем (СУВ) на базі бортової ЕОМ та цифрових засобів зовнішнього та внутрішнього зв'язку, які забезпечують основні завдання та характеристики управління вогнем і керування зброєю та іншими системами БМ, а також взаємодії.

Найпоширенішими системами навігації БМ сьогодні є системи, які побудовані на використанні супутникових радіонавігаційних систем (СНС) в поєднанні з автономними одометричними навігаційними системами (АНС). Такі системи називають комплексованими або інтегрованими системами навігації (КСН). Використання СНС у комплексі з АНС дозволяє використати переваги та компенсувати недоліки кожної з них і підвищити **достовірність визначення навігаційних даних**.

З метою досягнення максимальної ефективності застосування, СУВ та КСН БМ повинні взаємодіяти між собою на інформаційному рівні за оптимальної участі оператора.

Проблемними питаннями з точки зору практичної реалізації залишається побудова апаратної структури гарантоздатної інтегрованої СУВН, яка є інваріантною до об'єкта установа – БМ, впровадження математичного та інформаційного забезпечення, інтегрування СУВН БМ до автоматизованої системи управління вогнем (АСУВ) вищого рівня (АСУВ артилерійського, ракетного, загальновійськового підрозділу тощо).

Щодо інтегрованої КСН, то однією із проблем є забезпечення її гарантоздатності (функціональної надійності), тобто забезпечення отримання достовірних результатів за умови наявності несправностей та виникнення відмов різної природи.

**Аналіз публікацій і окреслення проблеми.** Аналіз публікацій із питань розроблення перспективних та модернізації існуючих самохідних ракетних та артилерійських систем показує, що одними із найбільш важливих та проблемних питань залишається оснащення цих БМ СУВ та СН, які взаємодіють між собою [18] з метою надання одна одній необхідної інформації.

СУВ в автоматизованому режимі забезпечує виконання завдань управління вогнем та керування зброєю та іншими системами БМ. Головним елементом СУВ є бортова ЕОМ (БЕОМ), яка, разом з іншими складовими СУВ, забезпечує виконання завдань управління, керування бортовими системами та взаємодії [1, 4–6, 8, 9].

Сучасні системи навігації БМ будуються як інтегровані (комплексовані), які поєднують у собі автономну одометричну навігаційну систему та супутникову радіонавігаційну систему. Інтегровані навігаційні системи у поєднанні з елементами електронної картографії все частіше застосовуються у сучасних наземних рухомих БМ на гусеничному та колісному шасі, які виконують завдання як у складі комплексів, так і автономно [1, 4–8, 10, 11].

СУВ та КСН під час бойової роботи взаємодіють між собою, утворюючи інтегровану СУВН, яка входить до складу і повинна забезпечити взаємодію із елементами АСУВ вищого рівня.

Проте питання побудови інваріантної структури СУВН бойової машини з точки зору практичної реалізації в літературі розглянуті недостатньо.

Також недостатньо розглянуті питання забезпечення гарантоздатності СУВН, а також інтегрування СУВН БМ до АСУВ вищого рівня.

**Мета статті.** Метою статті є узагальнення підходів до побудови інваріантної апаратної структури, впровадження математичного та інформаційного забезпечення інтегрованої гарантоздатної системи управління вогнем і навігації самохідної ракетної (артилерійської) системи з метою її інтегрування до автоматизованої системи управління вогнем ракетного (артилерійського, загальновійськового підрозділу), а також визначення та перевірка можливості її практичної реалізації.

Структура апаратури та принципи роботи інтегрованої СУВН. Структура апаратури інтегрованої СУВН самохідної ракетної (артилерійської) системи наведена на рисунку 1.

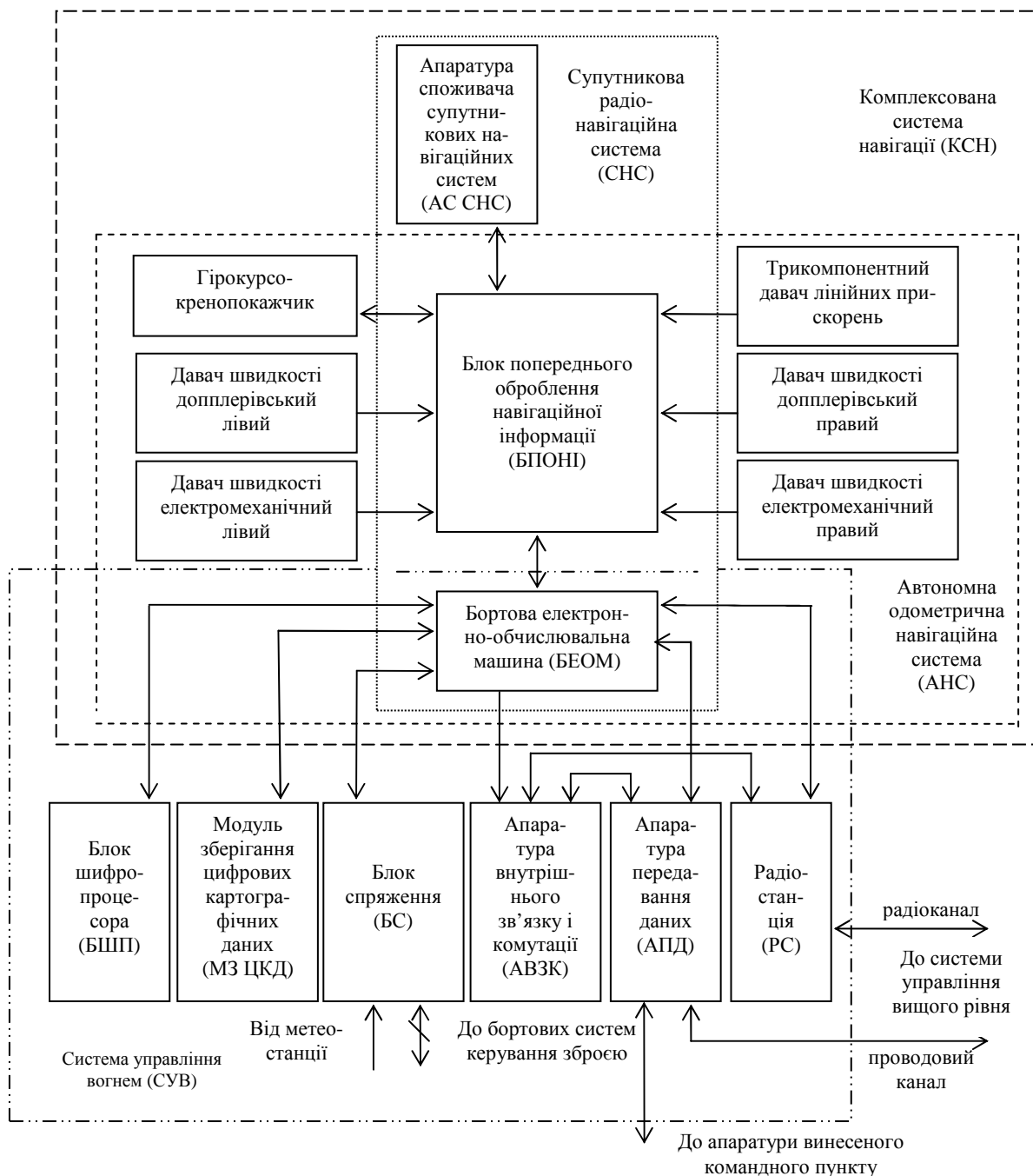


Рисунок 1 – Структура інтегрованої системи управління вогнем і навігації самохідної ракетної (артилерійської) системи

До складу СУВН входять: система управління вогнем (СУВ) [9], супутникова радіонавігаційна система (СНС) та автономна одометрична навігаційна система (АНС). При цьому останні дві системи утворюють комплексовану систему навігації (КСН) БМ [10, 11].

Спільним елементом всіх зазначених систем та головним системотвірним елементом СУВН є БЕОМ [12], яка виконує роль інтегруючого елемента СУВН.

СУВН є автоматизованою системою, яка функціонує під керуванням оператора.

До складу інтегрованої бортової СУВ [9] входить:

- БЕОМ [12];
- УКХ радіостанція (РС);
- апаратура передавання даних (АПД) [9];
- цифрова апаратура внутрішнього зв'язку та комутації (АВЗК);
- пристрій спряження з бортовими системами керування зброєю;
- блок шифропроцесора (БШП) [13, 14];
- апаратура зберігання цифрових картографічних даних.

СУВ забезпечує виконання таких типових завдань управління: збір даних про положення та стан БМ та підрозділ, до складу якого вона входить, постійна підтримка взаємодії, обмін даними із старшим командиром відкритими радіо- та проводовими каналами зв'язку; неперервне визначення власного місцеположення (у взаємодії з КСН), проведення видів підготовки, підготовка вогневої позиції до ведення вогню, підготовка стрільби, виконання вогневих завдань.

Функціональне програмне забезпечення БЕОМ разом із базою даних забезпечує:

- автоматизований збір та зберігання даних про БМ та підрозділ, до складу якого вона входить;
- розв'язання розрахункових задач видів забезпечення, а також бойової роботи;
- бойову роботу із використанням електронної карти на позиції та під час маршу;
- планування маршру;
- автономний автоматизований розрахунок установок для стрільби із використанням даних видів забезпечення;
- захист інформації (разом із БШП);
- обмін закодованими структурованими телекодовими повідомленнями (кодограмами) з абонентами ланки управління (разом з РС та АПД);
- автоматизоване керування бортовими системами керування зброєю.

Зовнішня мовна та телекодова інформаційна взаємодія із абонентами ланки управління здійснюється з використанням РС та АПД відкритими радіо- та проводовими каналами відповідно, при цьому забезпечується захист від нав'язування хибної телекодової інформації каналами зв'язку.

Взаємодія членів обслуги БМ забезпечується використанням цифрової АВЗК, елементи якої можуть бути розміщені як усередині, так і зовні кабіни (корпуса) БМ.

БЕОМ забезпечує також взаємодію із віддаленим терміналом з переносною АПД, який може бути розміщений на винесеному пункті управління.

СУВ взаємодіє з іншими бортовими системами БМ: комплексованою системою навігації (КСН), системами керування зброєю, метеостанцією.

До складу інтегрованої бортової КСН [10, 11] входить:

- бортова ЕОМ (БЕОМ) [12];
- блок попереднього оброблення навігаційної інформації (БПОНІ);
- апаратура споживачів супутникової навігаційної системи (АС СНС);
- гірокурсорепоказчик (ГККП);
- давачі швидкості доплерівські правий і лівий (ДШД П, ДШД Л);
- давачі швидкості електромеханічні правий і лівий (ДШМ П, ДШМ Л);
- трикомпонентний давач лінійних прискорень (ДЛП).

Робота КСН базується на безперервному визначенні (після початкового орієнтування) швидкості руху і кутів орієнтування наземної рухомої БМ, а також супутникових навігаційних даних. Дані вимірювань надходять від давачів швидкостей, прискорень та кутів, апаратури споживача супутникових навігаційних систем до БПОНІ для їх попереднього оброблення та комплексування. Результати комплексування (координати, висота, дирекційний кут, кути крену та диференту) передаються на БЕОМ для відображення місцеположення БМ на електронній карті місцевості та подальшого передавання засобами зв'язку іншим абонентам. Картографічні дані зберігаються у спеціальній апаратурі зберігання цифрових картографічних даних із складу СУВ. Конфіденційність зберігання картографічних та навігаційних даних забезпечується використанням БШП із складу СУВ.

Давачі швидкостей, прискорень та кутів разом із БПОНІ та БЕОМ утворюють автономну одометричну навігаційну систему (АНС).

Апаратура споживача супутникових навігаційних систем разом із БПОНІ та БЕОМ утворюють супутникову радіонавігаційну систему (СНС).

Для вимірювання швидкості руху використовуються дві пари давачів швидкості (доплерівський та електромеханічний), які розміщуються на лівому і правому бортах БМ. Як один, так і другий тип давачів швидкості мають свої переваги та недоліки [10]. При цьому у разі сумісного використання доплерівських та електромеханічних давачів та відповідного оброблення та комплексування даних від них вда-

ється використати ці переваги та скомпенсувати недоліки.

Для вимірювання кутів крену, диференту, істинного азимута поздовжньої осі БМ використовується гіроскопічний давач ГККП, який має власний відхід від заданого напрямку, причому похибка в обчисленні координат БМ за рахунок власного відходу ГККП може значно перевищувати похибку, яка виникає внаслідок неточного визначення швидкості руху БМ. Тому доцільне коригування показань ГККП, яке враховує інформацію про швидкість руху лівого і правого бортів. Це коригування реалізується за допомогою спеціального математичного забезпечення, яке реалізується в програмному забезпеченні БПОНІ.

АНС, яка утворюється на базі давачів швидкості, прискорень та кутів, характеризується достатніми миттєвими точностями, але згодом у системі накопичуються похибки визначення координат за рахунок постійного дрейфу гіроскопів ГККП і похибок обчислення швидкості. Тому досягнення задовільних точностей визначення координат є неможливим після деякого часу роботи АНС. В той же час, СНС позбавлена зазначеного недоліку. СНС забезпечує високу точність визначення координат, однак є неавтономною і незавадотійкою системою.

У БПОНІ з використанням алгоритму комплексування навігаційної інформації за даними, що надходять від давачів швидкостей, прискорень та кутів, а також АС СНС, розраховуються поточні координати, висота і кути орієнтування рухомої наземної БМ.

У КСН передбачено три режими роботи залежно від завдання і наявності достовірної інформації від давачів: супутникова навігація, автономна навігація, комплексна навігація.

Наявність у КСН трьох наведених вище режимів навігації забезпечується реалізацією у програмному забезпеченні БПОНІ структурного алгоритму комплексування супутникової та одометричної навігаційної інформації [15].

**Математичне забезпечення системи управління вогнем та навігації. Алгоритм комплексування навігаційної інформації** Математичне забезпечення СУВН є сукупністю математичних методів, моделей, алгоритмів, які призначені для їх використання в СУВН [16]. Відповідно до виконуваних функцій математичне забезпечення поділяється на системне, прикладне, тестове.

До системного математичного забезпечення СУВН належать математичні методи, моделі та алгоритми, які забезпечують організацію та ефективне функціонування технічних засобів (БЕОМ та її периферійних пристроїв) для реалізації завдань із введення-виведення, оброблення, зберігання, захисту, обміну інформації, контролю функціонування, захисту від збійних ситуацій, взаємодію оператора з БЕОМ, вирішують завдання обслуговування повідомлень, які надійшли до БЕОМ каналами зв'язку. Алгоритми системного математичного забезпечення обумовлені, зокрема, порядком (протоколами) приймання та передавання інформації.

До прикладного математичного забезпечення належать математичні методи, моделі та алгоритми, які забезпечують розв'язання прикладних інформаційних та розрахункових задач.

До тестового математичного забезпечення належать математичні методи, моделі та алгоритми, які застосовуються до тестування та верифікації апаратури та програмного забезпечення обчислювальних засобів та периферійних пристроїв.

Математичне забезпечення СУВН реалізується у програмному забезпеченні БЕОМ та БПОНІ.

За браком обсягу статті розглянемо тільки одну із складових спеціального прикладного математичного забезпечення - алгоритм жорсткого реального часу комплексування навігаційної інформації, що реалізується у програмному забезпеченні БПОНІ [15].

Для забезпечення роботи КСН у режимі супутникової навігації, автономної навігації та комплексної навігації, автоматичного визначення та переходу до найбільш доцільного режиму навігації у поточних умовах, для визначення та урахування під час роботи можливих несправностей або неправдивої інформації від давачів, різних швидкостей та характеру руху БМ, служить алгоритм попереднього оброблення та комплексування навігаційної інформації, що реалізується у програмному забезпеченні БПОНІ.

Вхідні дані алгоритму попереднього оброблення та комплексування навігаційної інформації надходять від БЕОМ, АС СНС, давача кутів просторового положення БМ (ГККП), давачів швидкостей, трикомпонентного давача лінійних прискорень. До початку руху від БЕОМ надходять, зокрема, ознаки режиму роботи (супутникова навігація, автономна навігація, комплексна навігація), початкові значення кутів, масив даних початкової директиви для АС СНС, початкові координати та висота. У процесі руху від БЕОМ надходить ознака працездатності модуля цифрової карти, а також отримана з цифрових картографічних даних поточна висота точки знаходження рухомої БМ. Від АС СНС надходять ознаки працездатності та достовірності даних, поточний час, прямокутні координати, номер зони, шляховий кут, швидкість, географічні координати та висота, прогнозована СКП вимірювання прямокутних координат. Від давача кутів надходять ознака працездатності, кути азимуту, крену та диференту машини. Від доплерівських та електромеханічних давачів надходять швидкості руху правого та лівого бортів машини. Від трикомпонентного давача лінійних швидкостей надходять лінійні швидкості руху, зокрема, у поперечній площині БМ.

Вихідними даними алгоритму комплексування навігаційної інформації є поточні прямокутні координати, номер зони, висота, поточні географічні координати, швидкість, дирекційний кут поздовжньої осі БМ, кути крену та диференту.

Алгоритм розроблений з урахуванням особливостей апаратури КСН:

- у ході виконання алгоритму враховуються недоліки та переваги доплерівського та електромеханічного давачів швидкості;
- алгоритм враховує накопичення похибки за рахунок дрейфу гіроскопів та похибок обчислення швидкості. У алгоритмі реалізований принцип оцінювання та зменшення впливу випадкового дрейфу гіроскопу наприкінці некоригованої ділянки роботи системи, час якої визначається реальними характеристиками давачів, що входять до складу системи і заданою точністю визначення навігаційних параметрів;
- алгоритм враховує такі недоліки СНС, як неавтономність та незавадостійкість, непрацездатність у разі тимчасового радіозатіннення, недостатня точність визначення висоти, так само як і її переваги щодо високої, незалежної від часу, точності визначення координат, а також вироблення оцінки точності їх визначення АС СНС;
- алгоритм враховує достатньо великі миттєві точності АНС, так само як і властивість накопичення з часом похибок АНС за рахунок постійного дрейфу гіроскопів і похибок визначення швидкості;
- алгоритм враховує наявність у складі апаратури блоку акселерометрів, що дають змогу взяти до уваги бокові зміщення, які не приводять до зміни орієнтації;
- у алгоритмі виконується коригування поточної висоти використанням цифрових картографічних даних, що зберігаються на БЕОМ;
- алгоритм оцінює можливість роботи та підтримує три режими навігації: супутникова навігація, автономна навігація, комплексна навігація, - залежно від наявності, достовірності та оцінки точності даних, які надходять від давачів;
- алгоритм передбачає автоматичний перехід з одного режиму в інший у разі виявлення у ході виконання алгоритму непрацездатності деяких давачів або недостовірності або хибності даних від певних компонентів, а також поновлення роботи у вибраному режимі у разі відновлення працездатності апаратури, що тимчасово була непрацездатна або давала явно неправдиві дані.

Моделювання алгоритму реального часу комплексування навігаційної інформації та роботи КСН дозволило отримати її прогнозовані технічні характеристики, які не поступаються аналогам.

**Забезпечення гарантоздатності системи управління вогнем та навігації.** Згідно з [17, 18] гарантоздатність визначає міру здатності об'єкта бути працездатним і виконувати покладені на нього функції у будь-який час виконання покладеної на нього місії за умови, що на початку виконання місії об'єкт був придатний до виконання цих функцій. Гарантоздатна система забезпечує виконання своїх функцій та отримання достовірних результатів за умов можливого виникнення несправностей, що можуть бути спричинені частковими відмовами деяких своїх складових. Необхідними властивостями гарантоздатної системи є її доступність, надійність, безпечність, захищеність, ремонтпридатність.

Розглянемо деякі технічні рішення, прийняті з метою підвищення гарантоздатності СУВН [10, 19].

Однією із властивостей гарантоздатної системи є її захищеність, здатність системи зберігати конфіденційність, забезпечувати цілісність.

Конфіденційність та цілісність інформації, що циркулює у СУВН, забезпечує БШП. БШП є засобом протистояння діям ворожого оточення, на нього покладаються завдання криптографічного захисту та верифікації інформації, а також вироблення електронного підпису.

Криптографічному захисту в системі підлягають цифрові картографічні дані, з яких формується електронна карта, дані, які зберігаються у базі даних БЕОМ. Також криптографічного захисту можуть потребувати повідомлення (кодограми), якими обмінюється БМ з об'єктами взаємодії відкритими каналами зв'язку.

Також у СУВН вжиті спеціальні заходи для забезпечення гарантоздатності КСН.

Гарантоздатність інтегрованої КСН БМ забезпечується:

- загальною структурою апаратних засобів системи, що враховує специфіку БМ;
- наявністю АНС і СНС та можливістю їх комплексування;
- наявністю давачів швидкостей, що побудовані на різних фізичних принципах;
- попереднім обробленням та комплексуванням навігаційної інформації у БПОІ з можливістю ручного задавання та автоматичного вибору режиму навігації: супутникова, автономна, комплексна;
- коригуванням визначеної висоти БМ за допомогою цифрових картографічних даних;
- наявністю у СУВ БШП для забезпечення конфіденційності навігаційної та картографічної інформації.

**Інтегрування системи управління вогнем та навігації бойової машини до автоматизованої системи управління вогнем вищого рівня.** СУВН БМ повинна бути сумісною та інтегрованою до



АСУВ вищого рівня.

Сумісність цих систем, тобто їх комплексна властивість взаємодіяти під час функціонування, включає технічну, інформаційну, організаційну, лінгвістичну, метрологічну сумісність.

Технічна сумісність характеризується можливістю взаємодії технічних засобів систем. Інформаційна сумісність характеризується можливістю використання одних і тих самих даних та обміну даними. Організаційна сумісність характеризується узгодженням правил дій обслуги, які регламентують взаємодію. Лінгвістична сумісність характеризується можливістю використання одних і тих самих мовних засобів, як мови взаємодії, так і мовних засобів спілкування обслуги з комплексом засобів автоматизації. Метрологічна сумісність характеризується тим, що точність результатів вимірювань, отриманих в одній системі, дозволяє використовувати їх в іншій системі [15].

Інтегрування СУВН БМ до АСУВ вищого рівня забезпечується дотриманням під час розроблення та експлуатування СУВН цілої низки документів, які розроблені з метою забезпечення сумісності цих систем:

- протоколів інформаційного обміну;
- протоколів організаційної, інформаційної та технічної сумісності (ОІТС);
- часткового словника оперативно-тактичних понять та військово-технічних термінів.

Розроблені документи та реалізовані на їх основі апаратура та програмне забезпечення забезпечують організаційну, інформаційну, технічну, лінгвістичну сумісність БМ із СУВН з існуючими, модернізованими та перспективними комплексами автоматизованого управління (КАУ) вищого рівня.

### Висновки

1. У роботі запропонована і обґрунтована апаратна структура уніфікованої інваріантної гарантоздатної інтегрованої системи управління вогнем і навігації самохідної ракетної (артилерійської) системи, яка інтегрується до автоматизованої системи управління вогнем вищого рівня (артилерійського, ракетного або загальновійськового підрозділу).

2. Апаратне, математичне, інформаційне, лінгвістичне, програмне забезпечення СУВН дозволяє автоматизоване виконання необхідних завдань навігації, управління вогнем, керування зброєю БМ, а також взаємодії.

3. Розроблені структури апаратури та спеціального математичного забезпечення дозволяють адаптувати та інтегрувати СУВН до практично будь-якої існуючої самохідної артилерійської (ракетної) системи під час її модернізації, а також використати СУВН у перспективних БМ. При цьому рівень уніфікації апаратного та програмного забезпечення може становити до 95%. Підсистеми та елементи СУВН можуть також бути використані у причіпних системах, а також у наземних рухомих об'єктах на колісному (гусеничному) шасі іншого призначення.

4. Запропонований підхід дозволяє побудувати гарантоздатну інтегровану СУВН БМ із функціональними та точнісними характеристиками, не гіршими за характеристики аналогів.

5. Запропоновані апаратні рішення СУВН, а також рішення з інформаційного та лінгвістичного забезпечення, організаційної, інформаційної та технічної сумісності, дозволяють інтегрувати БМ із СУВН до існуючої та перспективної системи управління тактичної ланки Сухопутних військ.

6. За попередніми оцінками, бойова ефективність БМ із інтегрованою СУВН збільшується на 35–45 % залежно від конкретних умов ведення бойових дій.

### Література

1. Масной В., Судаков Ю. Автоматизированные системы управления Сухопутными войсками США//Зарубежное военное обозрение. – 2003. – №№ 9, 10.
2. Ильченко А. Американская легкая гаубица М777//Зарубежное военное обозрение.– 2008.– №6.
3. Зарицкий В. „Бог войны” и сегодня на олимпе // Военный парад.– 2008. – №4.
4. Рекламні матеріали компанії NORINCO, КНР.
5. Рекламні матеріали компанії SAGEM, Франція.
6. Рекламні матеріали компанії LITEF, Німеччина.
7. LLN-GX LITEF Land Navigation System Product Description. Document 100059707. February, 3rd 2000. Revision 6.
8. Кокошкин Н. Вторая молодость артиллерии//Военный парад. – 2001. – №2. –С. 64–66.
9. Оліярник Б.О., Бондарук А.Б., Глебов В.В., Казаков Б.М., Євтушенко К.С. Система управління вогнем і командуванням модернізованої реактивної системи залпового вогню БМ-21У//Перспективи розвитку озброєння і військової техніки сухопутних військ. Збірка тез доповідей Другої Всеукраїнської науково-практичної конференції. – Львів:Львівський інститут Сухопутних військ. – 2009.

10. Бондарук А.Б., Глебов В.В., Євтушенко К.С., Оліярник Б.О. Гарантоздатна інтегрована система навігації рухомих наземних об'єктів//Вісник національного університету „Львівська політехніка”. Комп'ютерні системи та мережі. – Львів:Національний університет «Львівська політехніка». – 2008.
11. Бондарук А.Б., Глебов В.В., Євтушенко К.С., Оліярник Б.О. Інтегрована система орієнтації і навігації рухомих бойових машин//Інтегровані технології та енергозбереження. Щоквартальний науково-практичний журнал. – Харків:Національний технічний університет „Харківський політехнічний інститут”. – 2008. – №2. – С. 162–165.
12. Оліярник Б.О., Бондарук А.Б., Заїченко Н.Л. Бортова спеціалізована ЕОМ для бронетехніки//Вісник національного університету „Львівська політехніка”. Комп'ютерні системи та мережі. – Львів:Національний університет «Львівська політехніка». – 2006. – №573. – С. 15–21.
13. Глухов В., Заїченко Н., Оліярник Б. Шифропроцесор для бортових інформаційно-керуючих систем//Наукові нотатки. Міжвузівський збірник (за напрямком «Інженерна механіка»). – Луцьк: Луцький державний технічний університет. – 2007. – Випуск 19. – С. 33–43.
14. Глухов В.С., Євтушенко К.С., Заїченко Н.В., Оліярник Б.О. Криптографічні засоби спеціалізованої бортової ЕОМ для бронетехніки//Вісник Хмельницького національного університету – Хмельницький: Хмельницький національний університет. – 2007. – №2. – Технічні науки. Том 2. – С. 29–33.
15. Бондарук А.Б., Євтушенко К.С., Кононенко В.О., Оліярник Б.О. Алгоритм комплексування навігаційної інформації інтегрованої системи навігації бойової машини//Третий международный радиоэлектронный форум «Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития». Тезисы докладов. – Харьков:Харьковский национальный университет радиоэлектроники. - 2008.
16. ГОСТ 34.003-90. Информационная технология. Комплекс стандартов на автоматизированные системы. Автоматизированные системы. Термины и определения.
17. IEC 50(191):1990 International Electrotechnical Vocabulary. Chapter 191: Dependability and quality of service. 135 p.
18. IEC 60050-191-am2 (2002) Ed. 1.0 International Electrotechnical Vocabulary. Chapter 191: Dependability and quality of service.
19. Бондарук А.Б., Глухов В.С., Євтушенко К.С., Заїченко Н.В., Калінічев В.А, Оліярник Б.О. Гарантоздатна система оброблення навігаційних і картографічних даних//Правове, нормативне та метрологічне забезпечення системи захисту інформації в Україні. – Київ. – 2008. – Вип. 1(16).

Bibliography (transliterated)

1. Masnoj V., Sudakov Ju. Avtomatizirovannye sistemy upravlenija Suhoputnymi vojskami SSHA Zarubezhnoe voennoe obozrenie. – 2003. – ## 9, 10.
2. Il'chenko A. Amerikanskaja legkaja gaubica M777 Zarubezhnoe voennoe obozrenie.– 2008.– #6.
3. Zarickij V. „Bog vojny” i segodnja na olimpe Voennyj parad.– 2008. – #4.
4. Reklamni materiali kompanii NORINCO, KNR.
5. Reklamni materiali kompanii SAGEM, Francija.
6. Reklamni materiali kompanii LITEF, Nimechchina.
7. LLN-GX LITEF Land Navigation System Product Description. Document 100059707. February, 3rd 2000. Revision 6.
8. Kokoshkin N. Vtoraja molodost' artillerii Voennyj parad. – 2001. – #2. –S. 64–66.
9. Olijarnik B.O., Bondaruk A.B., Glebov V.V., Kazakov B.M., Evtushenko K.S. Sistema upravlinnja vognem i komanduvannjam modernizovanoi reaktivnoi sistemi zalpovogo vognju BM-21U Perspektivi roz-vitku ozbroennja i vijs'kovoї tehniki suhoputnih vijs'k. Zbirka tez dopovidej Drugoi Vseukraїns'koї nau-kovo-praktichnoi konferencii. – L'viv:L'vivs'kij institut Suhoputnih vijs'k. – 2009.
10. Bondaruk A.B, Glebov V.V., Evtushenko K.S., Olijarnik B.O. Garantozdatna integrovana sistema navigacii ruhomih nazemnih ob'ektiv Visnik nacional'nogo universitetu „L'vivs'ka politehnika”. Komp'juterni sistemi ta merezhi. – L'viv:Nacional'nij universitet «L'vivs'ka politehnika». – 2008.
11. Bondaruk A.B., Glebov V.V., Evtushenko K.S., Olijarnik B.O. Integrovana sistema orientacii i navigacii ruhomih bojovih mashin Integrovani tehnologii ta energozberezhennja. Shhokvartal'nij naukovopraktichnij zhurnal. – Harkiv:Nacional'nij tehnicnij universitet „Harkivs'kij politehnicnij institut”. – 2008. – #2. – p. 162–165.
12. Olijarnik B.O., Bondaruk A.B., Zaichenko N.L. Bortova specializovana EOM dlja bronetehni-ki Visnik nacional'nogo universitetu „L'vivs'ka politehnika”. Komp'juterni sistemi ta merezhi. – L'viv:Nacional'nij universitet «L'vivs'ka politehnika». – 2006. – #573. – p. 15–21.

13. Gluhov V., Zaichenko N., Olijarnik B. Shifroprocesor dlja bortovih informacijno-kerujuchih sistem Naukovi notatki. Mizhvuzivs'kij zbirnik (za naprjamkom «Inzhenerna mehanika»). – Luc'k: Luc'kij derzhavnij tehnicnij universitet. – 2007. – Vipusk 19. – p. 33–43.

14. Gluhov V.S., Cvtushenko K.C., Zaichenko N.V., Olijarnik B.O. Kriptografichni zasobi specializovanoi bortovoi EOM dlja bronetehniki Visnik Hmel'nic'kogo nacional'nogo universitetu – Hmel'ni-c'kij: Hmel'nic'kij nacional'nij universitet. – 2007. – #2. – Tehnicni nauki. Tom 2. – p. 29–33.

15. Bondaruk A.B., Cvtushenko K.C., Kononenko V.O., Olijarnik B.O. Algoritm kompleksuvannja navigacijnoi informacii integrovanoi sistemi navigacii bojovoї mashini Tretij mezhdunarodnyj radioje-lektronnyj forum «Prikladnaja radioelektronika. Sostojanie i perspektivy razvitija». Tezisy dokla-dov. – Har'kov:Har'kovskij nacional'nyj universitet radioelektroniki. 2008.

16. GOST 34.003-90. Informacionnaja tehnologija. Kompleks standartov na avtomatizirovannje sistemy. Avtomatizirovannje sistemy. Terminy i opredelenija.

17. IEC 50(191):1990 International Electrotechnical Vocabulary. Chapter 191: Dependability and quality of service. 135 p.

18. IEC 60050-191-am2 (2002) Ed. 1.0 International Electrotechnical Vocabulary. Chapter 191: Dependability and quality of service.

19. Bondaruk A.B. , Gluhov V.S., Cvtushenko K.S., Zaichenko N.V., Kalinichev V.A, Olijarnik B.O. Garantozdatna sistema obroblennja navigacijnih i kartograficnih danih Pravove, normativne ta metrologichne zabezpechennja sistemi zahistu informacii v Ukraїni. – Kiiv. – 2008. – Vip. 1(16).

УДК 681.325.5

Олиярник Б.А., Евтушенко К.С., Бондарук А.Б., Глебов В.В., Казаков Б.М., Кононенко В.А.

**ИНТЕГРИРОВАННАЯ ГАРАНТОСПОСОБНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ОГНЕМ  
И НАВИГАЦИИ САМОХОДНЫХ РАКЕТНЫХ И АРТИЛЛЕРИЙСКИХ СИСТЕМ  
НА КОЛЕСНОМ И ГУСЕНИЧНОМ ШАССИ**

В настоящей статье предлагается структура унифицированной гарантоспособной интегрированной системы управления огнем и навигации самоходных ракетных и артиллерийских систем на колесном и гусеничном шасси. Рассмотрены аппаратная структура и принципы работы системы, математическое обеспечение, алгоритм комплексирования навигационной информации. Обсуждаются решения по обеспечению гарантоспособности. Система интегрируется в существующую или перспективную автоматизированную систему управления огнем ракетного, артиллерийского или общевойскового подразделения.

Olijarnyk B.O., Yevtushenko K.S., Bondaruk A.B., Glyebov V.V., Kazakov B.M., Kononenko V.O.

**INTEGRATED DEPENDABLE FIRE CONTROL AND NAVIGATION SYSTEM  
OF SELF-PROPELLED ROCKET AND ARTILLERY SYSTEMS ON WHEELED  
AND TRACKED CHASSIS**

In this article structure of unified dependable integrated fire control and navigation system of self-propelled rocket and artillery systems is discussed. System hardware, principles of operation, mathematical support, navigational information complexation algorithm are examined. Dependability procurement solutions are considered. The system is integrated into existing or next-generation automated fire control system of rocket, artillery or combined-arms unit.

### ПОТРЕБНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПРИ СИНТЕЗЕ СРЕДСТВ ОБЕСПЕЧЕНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ И УПРАВЛЯЕМОСТИ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

**Актуальность и постановка задачи.** Проблема обеспечения необходимого уровня устойчивости и управляемости летательных аппаратов (ЛА) возникла с самого начала развития авиации. Большинство первых самолетов и вертолетов имели неудовлетворительные характеристики устойчивости и управляемости. Полет на этих аппаратах требовал сложной техники пилотирования и не обеспечивал требований безопасности полетов.

Для современного этапа развития авиационной техники характерны расширение диапазонов изменения параметров полета, многофункциональность, всережимность, повышение требований к точности управления. Вышеперечисленные факторы требуют соответствующих пилотажных свойств ЛА и необходимых характеристик устойчивости и управляемости.

Устойчивость и управляемость относятся к особенно важным характеристикам летательного аппарата, от которых во многом зависят безопасность полетов, точность и простота пилотирования и возможность реализации в полете летно-технических характеристик ЛА. Важным является также тот факт, что эксплуатационная область режимов полета многих современных ЛА ограничена исходя из недостаточного уровня устойчивости и управляемости ЛА на этих режимах.

**Цель исследования.** Таким образом, в настоящее время задача достижения приемлемых характеристик устойчивости и управляемости ЛА является актуальной и требует своего решения при модернизации существующих и разработке перспективных образцов авиационной техники. При создании ЛА конструкторские бюро проектируют средства обеспечения устойчивости и управляемости (СОУУ) исходя из своего собственного опыта, используя при этом, как правило, классические средства, прошедшие апробацию на практике. В данной работе предлагается на уровне концепции метод синтеза СОУУ, позволяющий из всей совокупности альтернативных вариантов выбрать такие СОУУ, которые обеспечивают выполнение заданных условий полета и требуемый уровень пилотажных свойств с учетом имеющихся ограничений на диапазоны отклонения органов управления ЛА. Логико-структурная схема основных этапов предлагаемого подхода к синтезу СОУУ приведена на рис. 1.

**Этапы формирования условий полета.** Рассмотрим более подробно этапы формирования условий полета ЛА, соответствующих заданному режиму полета, и требований к потребному управлению ЛА.

Запишем закон изменения момента количества движения ЛА [1]:

$$\frac{d\vec{K}}{dt} = \vec{M}_R - \vec{\omega} \times \vec{K}, \quad (1)$$

где  $\vec{K}$  – момент количества движения ЛА;  $\vec{M}_R$  – результирующий момент, действующий на ЛА;  $\vec{\omega}$  – вектор угловой скорости вращения связанных с ЛА осей.

Проекция вектора  $\vec{K}$  на оси связанной с ЛА системы координат имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} K_x &= I_x \omega_x - I_{xy} \omega_y - I_{xz} \omega_z; \\ K_y &= -I_{xy} \omega_x + I_y \omega_y - I_{yz} \omega_z; \\ K_z &= -I_{xz} \omega_x - I_{yz} \omega_y + I_z \omega_z. \end{aligned} \quad (2)$$

Если ЛА имеет плоскость симметрии, то  $I_{xz} = I_{yz} = 0$  и уравнения (2) упрощаются.

Спроецируем вектор  $\vec{K}$  (1) с учетом уравнений (2) на оси связанной системы координат:

$$\begin{aligned} I_x \dot{\omega}_x + (I_x - I_y) \omega_y \omega_z + I_{xy} (\omega_x \omega_z - \dot{\omega}_y) &= M_{Rx}; \\ I_y \dot{\omega}_y + (I_x - I_z) \omega_z \omega_x - I_{xy} (\omega_y \omega_z + \dot{\omega}_x) &= M_{Ry}; \\ I_z \dot{\omega}_z + (I_y - I_x) \omega_x \omega_y + I_{xy} (\omega_y^2 - \omega_x^2) &= M_{Rz}. \end{aligned} \quad (3)$$



Рисунок 1 – Логико-структурная схема основных этапов синтеза средств обеспечения устойчивости и управляемости ЛА

Правые части уравнений системы (3) имеют следующий вид:

$$\begin{aligned}
 M_{Rx} &= (m_x^\beta \beta + m_x^{\omega_x} \omega_x + m_x^{\omega_y} \omega_y + m_x^{\delta_3} \delta_3 + m_x^{\delta_H} \delta_H) qSl = m_x qSl ; \\
 M_{Ry} &= (m_y^\beta \beta + m_y^{\omega_x} \omega_x + m_y^{\omega_y} \omega_y + m_y^{\delta_3} \delta_3 + m_y^{\delta_H} \delta_H) qSl = m_y qSl ; \\
 M_{Rz} &= (m_z(\alpha) + m_z^\alpha \alpha + m_z^{\omega_z} \omega_z + m_z^{\varphi_{ст}} \varphi_{ст}) qSb_a = m_z qSb_a ,
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

где  $\alpha$  – угол атаки ЛА;  $\beta$  – угол скольжения ЛА;  $q$  – скоростной напор;  $m_x$  – коэффициент момента крена;  $m_y$  – коэффициент момента рыскания;  $m_z$  – коэффициент момента тангажа;  $\delta_H$  – угол отклонения руля направления;  $\delta_3$  – угол отклонения элеронов;  $b_a$  – средняя аэродинамическая хорда крыла ЛА;  $\varphi_{ст}$  – угол отклонения стабилизатора.

Систему уравнений (3) можно записать следующим образом:

$$\dot{\omega}_x = \frac{i_y \rho_x + i_{xy} \rho_y}{i_x i_y - i_{xy}^2} ;$$

$$\dot{\omega}_y = \frac{i_x \rho_y + i_{xy} \rho_x}{i_x i_y - i_{xy}^2};$$

$$\dot{\omega}_z = \frac{\rho_z}{i_z},$$

где  $\rho_x = m_x - i_{xy} \omega_x \omega_z + (i_y - i_z) \omega_y \omega_z$ ;  $\rho_y = m_y + i_{xy} \omega_y \omega_z + (i_z - i_x) \omega_x \omega_z$ ;  $\rho_z = m_z + (i_x - i_y) \omega_y \omega_x + i_{xy} (\omega_x^2 - \omega_y^2)$ ;

$$i_x = \frac{2I_x}{\rho V_\infty^2 S l}; \quad i_y = \frac{2I_y}{\rho V_\infty^2 S l}; \quad i_z = \frac{2I_z}{\rho V^2 S l}; \quad i_{xy} = \frac{2I_{xy}}{\rho V^2 S l}.$$

Систему (3) можно привести также к виду:

$$\begin{aligned} a_{11} \delta_3 + a_{12} \delta_H &= C_1; \\ a_{21} \delta_3 + a_{22} \delta_H &= C_2, \end{aligned} \quad (5)$$

где  $a_{11} = \frac{i_y m_y^{\delta_3} + i_{xy} m_x^{\delta_3}}{xy}$ ;  $a_{12} = \frac{i_y m_x^{\delta_H} + i_{xy} m_y^{\delta_H}}{xy}$ ;  $a_{21} = \frac{i_x m_y^{\delta_3} + i_{xy} m_x^{\delta_3}}{xy}$ ;  $a_{22} = \frac{i_x m_y^{\delta_H} + i_{xy} m_x^{\delta_H}}{xy}$ ;

$$C_1 = \dot{\omega}_x - \frac{i_y \rho'_x + i_{xy} \rho'_y}{xy}; \quad C_2 = \dot{\omega}_x - \frac{i_y \rho'_x + i_{xy} \rho'_y}{xy}; \quad xy = i_x i_y - i_{xy}^2.$$

Исходя из (5) отклонение элеронов  $\delta_3$  и руля направления  $\delta_H$  определяется следующим образом:

$$\delta_3 = \frac{\Delta \delta_3}{\Delta}; \quad \delta_H = \frac{\Delta \delta_H}{\Delta},$$

где  $\Delta \delta_3 = \begin{vmatrix} C_1 & a_{12} \\ C_2 & a_{22} \end{vmatrix}$ ;  $\delta_H = \begin{vmatrix} a_{11} & C_1 \\ a_{21} & C_2 \end{vmatrix}$ ;  $\Delta = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{vmatrix}$ .

Угол отклонения стабилизатора можно определить из 3-его уравнения системы (3):

$$\begin{aligned} \varphi_{ст} &= [I_z \dot{\omega}_z + (I_y - I_x) \omega_x \omega_y + I_{xy} (\omega_y^2 - \omega_x^2) - (m_z (\alpha) + m_z^{\dot{\alpha}} \dot{\alpha} + m_z^{\omega_z} \omega_z) q S b_a] \times \\ &\quad \times \frac{1}{m_z^{\varphi_{ст}} q S b_a}. \end{aligned} \quad (6)$$

Входящие в систему (3) угловые скорости  $\omega_x$ ,  $\omega_y$ ,  $\omega_z$  находятся из уравнений связи между угловыми скоростями в скоростной и связанной системах координат:

$$\begin{aligned} \omega_x &= \omega_{xa} \cos \alpha \cos \beta + \omega_{ya} \sin \alpha - \omega_{za} \cos \alpha \sin \beta + \dot{\beta} \sin \alpha; \\ \omega_y &= -\omega_{xa} \sin \alpha \cos \beta + \omega_{ya} \cos \alpha + \omega_{za} \sin \alpha \sin \beta + \dot{\beta} \cos \alpha; \\ \omega_z &= \omega_{xa} \sin \beta + \omega_{za} \cos \beta + \dot{\alpha}. \end{aligned} \quad (7)$$

Угловые скорости  $\omega_{xa}$ ,  $\omega_{ya}$ ,  $\omega_{za}$  определяются из следующих кинематических соотношений:

$$\begin{aligned} \omega_{xa} &= \dot{\gamma}_a + \psi_a \sin \vartheta_a; \\ \omega_{ya} &= \psi_a \cos \gamma_a \cos \vartheta_a + \dot{\vartheta}_a \sin \gamma_a; \end{aligned} \quad (8)$$

$$\omega_{za} = \dot{\vartheta}_a \cos \gamma_a - \dot{\psi}_a \cos \vartheta_a \sin \gamma_a .$$

Входящие в уравнения (4), (6), (8) скорость  $V$  и углы  $\vartheta_a$ ,  $\psi_a$ ,  $\gamma_a$  определяются с использованием уравнений динамики движения центра масс:

$$\begin{aligned} \dot{V} &= g(n_{xa} - \sin \vartheta_a); \\ \dot{\vartheta}_a &= \frac{g}{V}(n_{ya} \cos \gamma_a - \cos \vartheta_a - n_{za} \sin \gamma_a); \\ \dot{\psi}_a &= -\frac{g}{V \cos \vartheta_a}(n_{ya} \sin \gamma_a + n_{za} \cos \gamma_a). \end{aligned} \quad (9)$$

В уравнения (9) входят перегрузки  $n_{xa}$ ,  $n_{ya}$ ,  $n_{za}$ , которые также являются неизвестными, поэтому в систему (9) необходимо добавить ряд дополнительных уравнений. В качестве таких уравнений будем использовать уравнения, которые описывают условия полета ЛА. Рассмотрим формирование дополнительных уравнений на примере задачи перехвата воздушной цели. В этом случае такими уравнениями являются кинематические уравнения наведения [2].

Уравнение для определения угла визирования запишем следующим образом (рис. 2):

$$\vec{l}\vec{V} - lV \cos \varepsilon = 0, \quad (10)$$

где  $\varepsilon$  – угол визирования истребителя,  $\vec{l}$  – вектор, точка приложения которого расположена в центре масс перехватчика, а конец – в центре масс цели.

Входящее в уравнение (10) расстояние  $l$  может быть определено из следующего соотношения:

$$l = \sqrt{(X_{gц} - X_g)^2 + (Y_{gц} - Y_g)^2 + (Z_{gц} - Z_g)^2}, \quad (11)$$

где  $X_g$ ,  $Y_g$ ,  $Z_g$  – текущие координаты истребителя;  $X_{gц}$ ,  $Y_{gц}$ ,  $Z_{gц}$  – текущие координаты цели.

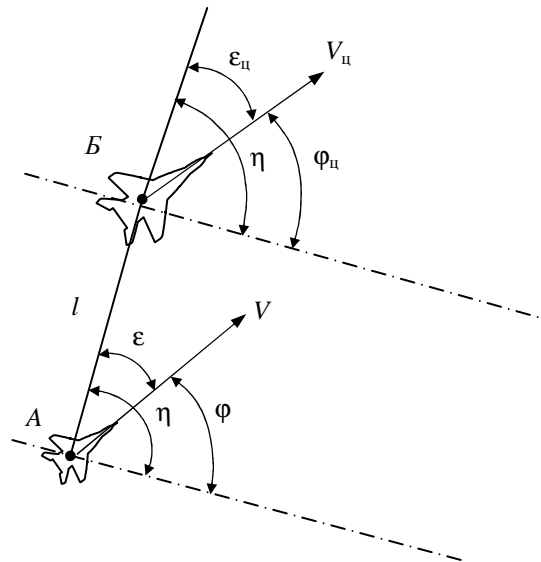


Рисунок 2

Текущие координаты цели и скорость цели  $V_{ц}$  считаются известными.

Скорость сближения  $V_{сб}$  перехватчика с целью определяется из уравнения:

$$V_{сб} = k_1 l + V_{сбк}, \quad (12)$$

где  $V_{\text{сбк}}$  – известная конечная скорость сближения перехватчика с целью при  $l = 0$ ;  $k_1$  – коэффициент пропорциональности.

Исходя из кинематических соотношений при перехвате воздушной цели можем записать:

$$V_{\text{сб}} = V \cos \varepsilon + V_{\text{ц}} \cos \varepsilon_{\text{ц}}. \quad (13)$$

Из выражения (13) следует, что скорость полета равна:

$$V = \frac{V_{\text{сб}} - V_{\text{ц}} \cos \varepsilon_{\text{ц}}}{\cos \varepsilon}. \quad (14)$$

Коэффициент  $k_1$  в уравнении (10) может быть определен из уравнения (11) для известных начальных условий в момент времени  $t = 0$ :

$$V = V_0; l = l_0; \varepsilon = \varepsilon_0; V_{\text{ц}} = V_{\text{ц}0}; \varepsilon_{\text{ц}} = \varepsilon_{\text{ц}0}.$$

Для величины  $k_1$  получаем:

$$k_1 = \frac{V_{\text{сбк}} - V_0 \cos \varepsilon_0 - V_{\text{ц}0} \cos \varepsilon_{\text{ц}0}}{l_0}. \quad (15)$$

С учетом (15) выражение для скорости сближения ЛА с целью примет следующий вид:

$$V_{\text{сб}} = (V_{\text{сбк}} - V_0 \cos \varepsilon_0 - V_{\text{ц}0} \cos \varepsilon_{\text{ц}0}) \frac{l}{l_0} + V_{\text{сбк}}. \quad (16)$$

После подстановки (16) в (14) получим:

$$V = \frac{(V_{\text{сбк}} - V_0 \cos \varepsilon_0 - V_{\text{ц}0} \cos \varepsilon_{\text{ц}0}) \frac{l}{l_0} + V_{\text{сбк}} - V_{\text{ц}} \cos \varepsilon_{\text{ц}}}{\cos \varepsilon}. \quad (17)$$

Проецируя скорость перехватчика  $V$  и скорость цели  $V_{\text{ц}}$  на нормаль к линии визирования, получим еще одно дополнительное уравнение:

$$l\dot{\eta} = V \sin \varepsilon - V_{\text{ц}} \sin \varepsilon_{\text{ц}}, \quad (18)$$

где  $\eta$  – угол между линией отсчета и линией визирования.

Для углов может быть записано следующие соотношение:

$$\eta = \varepsilon + \varphi = \varepsilon_{\text{ц}} + \varphi_{\text{ц}}, \quad (19)$$

где углы  $\varphi$  и  $\varphi_{\text{ц}}$  характеризуют направление в рассматриваемый момент времени скорости истребителя и цели относительно линии отсчета.

Кроме кинематических уравнений наведения в качестве дополнительного уравнения используем также уравнение переходного процесса по углу скольжения:

$$\beta = B_0 e^{-n_{0\text{бок}} t} \sin(\omega_{\text{бок}} t + \varphi_{\beta}), \quad (20)$$

где  $B_0$  – амплитуда колебаний в начальный момент времени  $t = 0$ ;  $n_{0\text{бок}}$  – коэффициент затухания;  $\omega_{\text{бок}}$  – собственная частота колебаний;  $\varphi_{\beta}$  – начальная фаза колебаний.



Для расчета положения ЛА используются следующие соотношения:

$$\begin{aligned}\dot{X}_g &= V \cos \vartheta_a \cos \psi_a ; \\ \dot{Y}_g &= V \sin \vartheta_a ; \\ \dot{Z}_g &= -V \cos \vartheta_a \sin \psi_a .\end{aligned}\tag{21}$$

**Выводы.** Решение полученной системы уравнений (3), (7), (8), (9), (10), (12), (13), (18), (20) позволяет получить траекторию движения истребителя и требуемое отклонение его органов управления при атаке воздушной цели, что используется при синтезе СОУУ разрабатываемых и модернизируемых ЛА.

#### Литература

1. Бюшгенс Г.С., Студнев Р.В. Динамика самолета. Пространственное движение. – М.: "Машиностроение", 1983. – 320 с.
2. Андреевский В.В. и др. Аэромеханика самолета. – М.: "Машиностроение", 1977. – 415 с.

#### Bibliography (transliterated)

1. Bjushgens G.S., Studnev R.V. Dinamika samoleta. Prostranstvennoe dvizhenie. – M.: "Mashinostroenie", 1983. – 320 p.
2. Andreevskij V.V. i dr. Aeromehanika samoleta. – M.: "Mashinostroe-nie", 1977. – 415 p.

УДК 629.7.001

Ковтонюк І.Б., Аніпко О.Б.

### **ПОТРІБНЕ УПРАВЛІННЯ ПРИ СИНТЕЗІ ЗАСОБІВ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СТІЙКОСТІ ТА КЕРОВАНОСТІ ЛІТАЛЬНОГО АПАРАТУ**

У даній роботі пропонується на рівні концепції метод синтезу засобів забезпечення стійкості та керованості літального апарата, який дозволяє з усієї сукупності альтернативних варіантів вибрати такі, що забезпечують виконання заданих умов польоту та рівень пілотажних властивостей, які вимагаються, з урахуванням існуючих обмежень на діапазони відхилення органів керування літального апарата.

Kovtonyuk I.B., Anipko O.B.

### **REQUIRED CONTROL AT SYNTHESIS OF DEVICES WHICH PROVIDE STABILITY AND CONTROLLABILITY OF AIRCRAFT**

The method of synthesis of devices which provide stability and controllability of aircraft is offered in this work at the level of conception, allowing from all of aggregate of alternative variants to choose such, which provide implementation of the set terms of flight and required level of pilotage properties taking into account present limits on the ranges of rejection of aircraft control.

«ИНТЕГРИРОВАННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ»

Ежеквартальный научно-практический журнал

Редколлегией к опубликованию принимаются статьи по следующим научным направлениям:

- ✓ энергетика и энергосбережение; энерготехнология энергоемких отраслей промышленности; нетрадиционная энергетика; ресурсосбережение; энергетика и окружающая среда;
- ✓ теплоиспользующие установки; моделирование процессов промышленного оборудования; процессы и аппараты различных отраслей промышленности (химической, пищевой, мед. оборудования и проч.);
- ✓ применение ЭВМ в технологических процессах; автоматизированные системы управления и обработки информации;
- ✓ тепло- и массообменные процессы и оборудование специальной техники; тепловые процессы и криогенное оборудование медицинского назначения;
- ✓ электроэнергетика; оборудование электростанций и передача электроэнергии;
- ✓ экономические аспекты энергетики и промышленной экологии; коммерческий инжиниринг, реинжиниринг и технологический менеджмент,

а также другим направлениям, на стыке различных отраслей знаний.

Материалы к опубликованию в каждый последующий номер принимаются до 20 числа последнего месяца предыдущего квартала. Рукописи авторам не возвращаются.

Материал должен быть подготовлен на IBM-совместимом компьютере и распечатан в 2-х экземплярах. К материалам должен прилагаться диск CD-R или CD-RW со статьей, набранной в редакторе текстов MS Word for Windows версий 97, XP, 2000 или 2003.

К статье необходимо приложить экспертное заключение о возможности опубликования материалов в открытой печати и рецензию доктора наук по профилю подаваемой статьи.

**ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЬИ:**

Размер бумаги А4 (210x297 мм); левое и правое поля – 25 мм, верхнее и нижнее – 30 мм; рекомендуемый шрифт Times New Roman Сут; размер шрифта – 10; межстрочный интервал – 1.

**ПОРЯДОК РАЗМЕЩЕНИЯ МАТЕРИАЛА:**

- непосредственно под верхней границей слева БОЛЬШИМИ БУКВАМИ печатается УДК статьи;
- пропустив одну строку, по центру печатаются инициалы и фамилии авторов;
- пропустив одну строку, по центру полужирным шрифтом **БОЛЬШИМИ БУКВАМИ** печатается название статьи;
- пропускается одна строка и с абзаца (1,25 см) печатается основной текст, отформатированный по ширине страницы;
- перед и после формул и уравнений должно быть расстояние в одну пустую строку до текста с интервалом 1;
- формулы и уравнения должны быть выровнены по центру;
- номера формул и уравнений выровнены по правому краю;
- размер шрифта формул и уравнений для основного текста – 12 пт.;
- рисунки, схемы и графики должны быть выполнены в черно-белом изображении;
- пропустив одну строку, следует список литературы, оформленный в соответствии с требованиями ДСТУ;
- в конце статьи на украинском (русском – для статьи на украинском языке), русском и английском языках должны быть напечатаны УДК, авторы, название и аннотация.

Статьи, рекомендуемые к опубликованию членами редколлегии, не проходят рецензирования. Остальные статьи рецензируются.

**РЕДКОЛЛЕГИИ**

Украина, 61002,  
Харьков-2, ул. Фрунзе, 21,  
НТУ «ХПИ», редколлегия журнала  
«Интегрированные технологии и энергосбережение»,  
секретарю редколлегии Горбунову К.А.  
Тел. (057) 707-69-58.  
(057) 707-61-99  
Email: [sita\\_gor@mail.ru](mailto:sita_gor@mail.ru)

**СТАТЬИ, ОФОРМЛЕННЫЕ НЕ В СООТВЕТСТВИИ С ПРАВИЛАМИ, РЕДКОЛЛЕГИЕЙ НЕ РАССМАТРИВАЮТСЯ**

**НА ЖУРНАЛ ОТКРЫТА ПОДПИСКА В ПОЧТОВЫХ ОТДЕЛЕНИЯХ УКРАИНЫ**

**ПОДПИСНОЙ ИНДЕКС 22786**