

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ КОРАБЛЕБУДУВАННЯ

імені адмірала Макарова

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

ОДЕСЬКА НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

КОРНІЄНКО ВІКТОРІЯ СЕРГІЇВНА

УДК 621.181.27

ДИСЕРТАЦІЯ

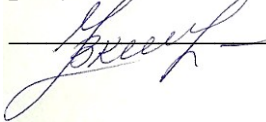
**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ТЕПЛОУТИЛІЗАЦІЙНИХ
КОНТУРІВ КОГЕНЕРАЦІЙНИХ УСТАНОВОК ПРИ ВИКОРИСТАННІ
ВОДОПАЛИВНИХ ЕМУЛЬСІЙ**

Спеціальність 05.14.06 – технічна теплофізика та промислова теплоенергетика

Технічні науки

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Виконання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело



В.С. Корнієнко

Примірник дисертації ідентичний
за змістом з іншими примірниками

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради
Д 41.088.03



Науковий керівник:
Андрєв Андрій Адольфович,
канд. техн. наук, доцент

д.т.н., професор В.І. Мілованов

Одеса – 2018

АНОТАЦІЯ

Корнієнко В.С. Підвищення ефективності теплоутилізаційних контурів когенераційних установок при використанні водопаливних емульсій. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук (доктора філософії) за спеціальністю 05.14.06 – технічна теплофізика та промислова теплоенергетика. – Одеська національна академія харчових технологій, Одеса, 2018.

У **вступі** обґрунтована актуальність теми дисертаційної роботи і сформульовані мета і завдання дослідження, відображена наукова новизна і практична цінність отриманих результатів.

У **першому розділі** виконаний аналіз наукових уявлень про вплив фізико-хімічних процесів на техніко-економічні та екологічні показники роботи котлів. На підставі виконаного аналізу встановлено, що відсутні кількісні дані зі швидкості корозії і забруднення НТПН при використанні ВПЕ з надлишком повітря α вище 1,5 (до 3,0), що впливає на ефективність теплопередачі, на теплотехнічні і економічні характеристики КЕУ.

На підставі проведеного в першому розділі аналізу сформульовані мета і задачі дослідження.

У **другому розділі** представлено обґрунтування прийнятих методів і методики досліджень і вимірювань.

Представлена послідовність проведення аналітичних і експериментальних досліджень теплохімічних процесів в газах і на низькотемпературних поверхнях нагріву утилізаційних котлів (УК), дослідження теплопередачі при $t_{\text{ст}}$ вище і нижче $t_{\text{р H}_2\text{SO}_4}$, а також визначення впливу різних чинників на економічні показники роботи УК у складі КЕУ.

Третій розділ присвячено дослідженням теплофізичних і теплохімічних процесів корозії та забруднення, що впливають на формування шару забруднень певної товщини і його термічний опір при використанні рідкого

палива і ВПЕ на його основі.

Проведені дослідження кінетики низькотемпературної сірчаноокислотної корозії (НТК) на реальному УК і експериментальній установці при температурі стінки $t_{\text{ст}} = 110\text{ }^{\circ}\text{C}$, що відповідає корозійному піку, дозволили одержати апроксимаційні рівняння, що дозволяють прогнозувати розвиток процесів корозії.

Проведені дослідження кінетики НТК дозволили отримати напівемпіричні залежності питомої втрати маси металу ΔG_k від вмісту сірки S^r в паливі, води W^r у ВПЕ і коефіцієнта надлишку повітря α , які показали, що при водовмісті ВПЕ близько 30 % інтенсивність процесів корозії істотно знижується.

За допомогою прийнятої математичної моделі кінетики НТК одержані залежності швидкості корозії від температури стінки за 100 і 1000 годин. Результати досліджень НТК дозволяють визначити мінімальне значення температури стінки конденсаційної НТПН $t_{\text{ст}}^{\text{min}}$, при якому забезпечується надійна робота цієї НТПН при допустимій швидкості 0,25 мм/рік. Значення цієї $t_{\text{ст}}^{\text{min}}$, що складає $70\text{ }^{\circ}\text{C}$, дозволяє визначити мінімальне значення температури газів на виході із УК, прийнявши відповідне значення температурного напору.

На підставі отриманих експериментальних даних і апроксимаційних рівнянь отримані напівемпіричні залежності питомої маси забруднення ΔG_z від вмісту сірки S^r , води W^r у ВПЕ і надлишку повітря α .

На підставі проведених досліджень, даних кінетики розвитку забруднень, диференціювання отриманих регресійних рівнянь отримані залежності швидкості забруднення від температури стінки при $\tau = 8$ годин і $\tau = 1000$ годин.

Для оцінки впливу на інтенсивність корозії ΔG_k і забруднення ΔG_z якості палива (S^r , W^r), що спалюється і режимів його використання (коефіцієнт надлишку повітря α) було проведено регресійний аналіз за допомогою програмного пакету Statgraphics Centurion XV. Отримані регресійні рівняння, які описують інтенсивність корозії $\Delta G_k = f(W^r; S^r; \alpha)$ і забруднення

$$\Delta G_3 = f(W^r; S^r; \alpha)$$

В **четвертому розділі** представлені експериментально-теоретичні дослідження особливостей процесів теплопровідності при використанні ВПЕ.

Значення коефіцієнтів еквівалентної теплопровідності шару забруднень конвективних поверхонь суттєво залежить від їх пористості Π . Для проведення досліджень прийнята модель пористості вільно насипаних сферичних часток і їх фрагментів з урахуванням можливого "вилучення" частини з них.

На основі проведених досліджень прийнято, що для сухих поверхонь при використанні необводненого мазуту (W^r до 2 %) $\Pi = 0,7$, а при використанні емульсії з водовмістом W^r до 30 % пористість збільшується до 0,9. На конденсаційних поверхнях при використанні мазуту – $\Pi = 0,3$, а при використанні ВПЕ – $\Pi = 0,48$.

В **п'ятому розділі** представлені результати досліджень впливу термічного опору шару забруднень (коефіцієнта забруднення) на інтенсивність теплопередачі.

На основі проведених експериментальних і теоретичних досліджень були отримані залежності коефіцієнтів забруднення ε_3 від температури стінки $\varepsilon_3 = f(t_{ст})$ при $\tau = 1000$ годин, які показують, що при однакових температурах стінки $t_{ст}$ при використанні ВПЕ з $W^r = 30$ % на основі мазуту М40 значення коефіцієнтів забруднення ε_3 істотно нижчі, ніж при використанні мазуту з $W^r = 2$ %: в зоні мокрих забруднень - в 2,6 рази; в зоні сухих забруднень - в 2 рази.

Були проведені розрахункові дослідження і побудовані залежності коефіцієнтів теплопередачі k_3 з урахуванням одержаних значень ε_3 при температурах поверхні нагрівання в діапазоні 70...210 °С при використанні ВПЕ з різним водовмістом і мазуту.

Істотне зниження коефіцієнта теплової ефективності в конденсаційній зоні при часі впливу потоку газів $\tau = 1000$ годин вказує на те, що з метою одержання високих значень ζ необхідно зменшувати період між «сильними» очищеннями (наприклад, шляхом обмивки) до 8 годин.

У шостому розділі представлені схеми теплоутилізаційних контурів КЕУ з використанням допалювання додаткового палива перед УК. Розраховані масогабаритні характеристики УК.

Наукові результати, які автор захищає, та їх новизна:

Вперше:

- отримані напівемпіричні залежності питомої втрати маси металу від водовмісту водопаливної емульсії $\Delta G_k = f(W^r)$, вмісту сірки у вихідному паливі $\Delta G_k = f(S^r)$ і коефіцієнта надлишку повітря $\Delta G_k = f(\alpha)$ при температурах стінки $t_{ст}$ нижче температури точки роси пари сірчаної кислоти $t_{p\ H_2SO_4}$, які характеризують інтенсивність низькотемпературної корозії конденсаційних поверхонь нагріву на різних режимах роботи утилізаційних котлів $t_{p\ H_2SO_4}$;

- отримані напівемпіричні залежності питомої маси забруднення від водовмісту емульсії $\Delta G_3 = f(W^r)$, вмісту сірки у вихідному паливі $\Delta G_3 = f(S^r)$ і коефіцієнта надлишку повітря $\Delta G_3 = f(\alpha)$ при температурах стінки $t_{ст}$ нижче температури точки роси пари сірчаної кислоти $t_{p\ H_2SO_4}$, що дозволяють визначати аеродинамічний опір конденсаційних поверхонь нагріву і періодичність їх очищення;

- розроблена тривимірна модель і отримане рівняння регресії, які описують інтенсивність корозії $\Delta G_k = f(W^r; S^r; \alpha)$ низькотемпературних поверхонь нагріву, що дають можливість розраховувати мінімальне значення температури стінки як умови надійної експлуатації конденсаційних поверхонь нагріву;

- розроблена тривимірна модель і отримане рівняння регресії, які описують інтенсивність забруднення $\Delta G_3 = f(W^r; S^r; \alpha)$ низькотемпературних поверхонь нагріву і дають змогу обчислювати коефіцієнт забруднення конденсаційних поверхонь нагріву утилізаційних котлів;

- отримані залежності коефіцієнтів забруднення ε_3 для конденсаційних низькотемпературних поверхонь нагріву від швидкості газів, водовмісту водопаливної емульсії W^r , і температури стінки $t_{ст}$, що дозволяють визначити

періодичність очищення сухих і конденсаційних поверхонь нагріву, які забезпечують оптимальні теплотехнічні показники утилізаційних котлів;

- розроблена тривимірна модель і отримане рівняння регресії, які описують коефіцієнт забруднення $\varepsilon_3 = f(t_{\text{ст}}, W^r, w_r)$ і дають можливість розраховувати інтенсивність теплообміну в сухих і конденсаційних поверхнях нагріву утилізаційних котлів при їх проектуванні.

Практичну цінність становлять результати дослідження:

- рекомендації з визначення інтенсивності низькотемпературної корозії і забруднення та періодичності очищення сухих і конденсаційних низькотемпературних поверхонь нагріву в залежності від складу палива і режимів його спалювання, що забезпечують надійну експлуатацію поверхонь нагріву;

- методика розрахунку коефіцієнтів забруднення ε_3 сухих і конденсаційних поверхонь нагріву утилізаційних котлів в залежності від швидкості газів, коефіцієнта надлишку повітря α , вмісту сірки в паливі S^r , водовмісту водопаливної емульсії W^r і температури стінки $t_{\text{ст}}$, що дозволяє проводити конструктивні розрахунки конвективних поверхонь нагріву;

- рекомендації з визначення коефіцієнтів забруднення ε_3 для сухих і конденсаційних низькотемпературних поверхонь нагріву в залежності від швидкості газів, коефіцієнта надлишку повітря α , вмісту сірки в паливі S^r , водовмісту водопаливної емульсії W^r і температури стінки $t_{\text{ст}}$ при проектуванні конвективних поверхонь нагріву утилізаційних котлів;

- визначений діапазон температури стінки $t_{\text{ст}}$ за безпечної експлуатації конденсаційних низькотемпературних поверхонь нагріву, що відкриває можливості для глибокої утилізації;

- отримані дані щодо періодичності очищення конвективних низькотемпературних поверхонь нагріву при використанні водопаливних емульсій, які підтверджують її збільшення в 2...3 рази і відповідне скорочення експлуатаційних витрат порівняно з експлуатацією на природних паливах.

Впровадження розроблених рекомендацій у практику проектування

дозволяє поліпшити характеристики утилізаційних котлів і теплоутилізаційних контурів когенераційних установок, одержувати більш достовірні їх значення в залежності від складу палива і режимів роботи когенераційної установки.

Ключові слова: водопаливні емульсії, утилізаційний котел, когенераційна установка, конденсаційна поверхня нагріву, низькотемпературна корозія, забруднення.

ABSTRACT

Kornienko V.C. Improvement of the heat recovery circuits efficiency of cogeneration units with the use of water-fuell emulsions. – The manuscripts.

Thesis for a Candidate of Technical Sciences degree in specialty 05.14.06 – Technical Thermophysics and Industrial Heat Power Engineering. – Odessa National Academy of Food Technologies, Odessa, 2018.

In the introduction the relevance of thesis topic is substantiated and purpose and objectives of the research are formulated, scientific novelty and practical value of results are reflects.

In the first section analysis of scientific ideas about influence of physical and chemical processes on technical, economic and environmental performance of boilers are carried out. On the basis of the performed analysis it was established that there are no quantitative data of corrosion and pollution rate of the low-temperature heating surfaces (LTHS) when using water-fuel emulsions (WFE) with excess air factor α above 1,5 (up to 3,0), which affects efficiency of heat transfer, heat engineering and economic characteristics of cogeneration units (CEU).

Based on the analysis in first section, the aim and objectives of the study were formulated.

The second section presents justification of accepted methods and methods of research and measurement.

The sequence of conducting analytical and experimental studies of thermochemical processes in gases and at low temperature heating surfaces of exhaust gas boiler (EGB), research of heat transfer at t_s above and below $t_{p\text{H}_2\text{SO}_4}$, as well as determination of various factors influence on EGB economic indicators work in CEU is presented.

The third section is devoted to research of corrosion and pollution thermochemical processes, which influence on formation of pollutions layer of certain thickness and its thermal resistance when standard fuel oil and WFE using.

The researches of LTK kinetics on the real EGB and experimental installation at wall temperature $t_s = 110\text{ }^{\circ}\text{C}$, which corresponds to corrosion peak, have allowed to obtain approximation equations which allow to predict the corrosion processes development.

The conducted researches of the LTC kinetics allowed to obtain experimental dependences $\Delta G_c = f(S^r)$, $\Delta G_c = f(\alpha)$, $\Delta G_c = f(W^r)$, which showed that under water content WFE about 30 %, the intensity of corrosion processes is significantly reduced.

Using accepted mathematical model of LTC kinetics, dependences of corrosion rate from wall temperature were obtained for 100 and 1000 hours. The results of LTC research allow to determine the minimum value of condensation LTHS wall temperature, which provides reliable work of this LTHS at permissible speed of 0,25 mm/year. This value, which makes up $70\text{ }^{\circ}\text{C}$, allows to determine gases temperature minimum value at outlet of EGB, taking the corresponding value of temperature pressure Δt .

Based on obtained experimental data and regression equations, dependences of the specific growth of pollution ΔG_p on content of sulfur S^r , water W^r and excess air factor α .

Based on conducted researches, data of pollution development kinetics, differentiation of regression equations, dependence of pollution rate at $\tau = 8$ hours and $\tau = 1000$ hours are obtained.

Regression analysis using Statgraphics Centurion XV software package was performed for evaluate effect of corrosion ΔG_c and pollution ΔG_p intensity from fuel quality (S^r , W^r) and its modes of use (air excess factor α). The obtained regression equations describing the corrosion intensity $\Delta G_c = f(W^r; S^r; \alpha)$ and pollution $\Delta G_p = f(W^r; S^r; \alpha)$.

In the fourth section experimental and theoretical studies of heat conductivity processes peculiarities when using WFE are presented. The values of contaminant layer equivalent heat conductivity coefficients of convective surfaces substantially depends from their porosity. For research porosity model of freely poured spherical

particles and their fragments is adopted taking into account their possible "extraction".

On the basis of conducted researches, it was assumed that for dry surfaces using unrefined fuel oil (W^r to 2 %), $P = 0,7$, and when using WFE with water content W^r up to 30 %, the porosity increased to 0,9. On condensation surfaces with using of fuel oil – $P = 0,3$, and when using WFE – $P = 0,48$.

In the fifth section the research results of influence of pollution layer thermal resistance on heat transfer intensity are presented.

On the basis of experimental and theoretical studies, dependences of pollution coefficients ε_p at wall temperature $\varepsilon_p = f(t_s)$ at $\tau = 1000$ hours. They shows that at same wall temperature t_s when combusting WFE with $W^r = 30$ % on basis of fuel oil, value of the pollution coefficients are not significantly, than at combustion of fuel oil with $W^r = 2$ %: in the zone of wet pollution - in 2,6 times; in the zone of dry pollution - in 2 times.

The calculations were carried out and dependences of heat transfer coefficients k_p on temperature of heating surface in the range of 70...210 °C when using of WFE and standard fuel oil were constructed.

Significant decrease of thermal efficiency coefficient in condensation zone with the time of gas flow $\tau = 1000$ hours indicates that in order to obtain high values ζ it is necessary to reduce period between "strong" cleaning (for example, by washing) up to 8 hours.

In the sixth section, diagrams of heat recovery circuits of CEU with the use of the addition fuel in front of CEU are presented. The mass-dimensional characteristics of EGB are calculated.

Scientific results, which author protects, and their novelty:

For the first time:

- semiempirical dependences of specific mass loss of metal from water content of water-fuel emulsion $\Delta G_c = f(W^r)$, the sulfur content in fuel $\Delta G_c = f(S^r)$ and excess air factor $\Delta G_c = f(\alpha)$ at wall temperatures t_s below point temperature dew sulfuric

acid pairs, which characterize intensity of low temperature corrosion of condensation heating surfaces at different operating modes of exhaust gas boilers;

- semiempirical dependences of specific mass of pollution from water content of emulsion $\Delta G_p = f(W^r)$, sulfur content in fuel $\Delta G_p = f(S^r)$, and excess air factor $\Delta G_p = f(\alpha)$ at wall temperatures t_s below point temperature dew sulfuric acid pairs, allowing to determine aerodynamic resistance of condensation heating surfaces and frequency of their purification;

- three-dimensional model was developed and regression equations was obtained describing the corrosion intensity $\Delta G_c = f(W^r; S^r; \alpha)$ of low temperature heating surfaces, which enable to calculate wall temperature minimum value as condition for reliable operation of condensing heating surfaces;

- three-dimensional model was developed and the regression equation was obtained that describes intensity of pollution $\Delta G_p = f(W^r; S^r; \alpha)$ of low temperature heating surfaces and allows to calculate pollution coefficient of condensation heating surfaces of exhaust gas boilers;

- dependences of pollution coefficients for condensation low-temperature heating surfaces from speed of gases, the water content of water-fuel emulsion W^r and wall temperature t_s , which provide optimal thermal and engineering parameters of exhaust gas boilers;

- three-dimensional model was developed and regression equation was obtained, which describes the pollution factor $\varepsilon_p = f(t_s, W^r, w_g)$ and allow to calculate heat exchange intensity of dry and condensing heating surfaces of exhaust gas boilers during their design.

Practical value are the results of study:

- recommendations for determining of low temperature corrosion and pollution intensity and cleaning frequency of dry and condensing low temperature heating surfaces depending from fuel composition and its modes of combustion, which ensure reliable operation of heating surfaces;

- method of pollution factors ε_s calculation of dry and condensation heating surfaces of exhaust gas boilers depending on gas speed, excess air factor α , sulfur

content in fuel S^r , water content of water emulsion W^r and wall temperature t_s , which allows constructive calculations of convective heating surfaces;

- recommendations for determining pollution coefficients for dry and condensation low temperature heating surfaces, depending from gases speed, excess air factor α , sulfur content S^r in fuel, water content of emulsion W^r and wall temperature t_s when designing convective heating surfaces of exhaust gas boilers;

- the temperature range of wall t_s is determined for safe operation of condensing low-temperature heating surfaces, which opens opportunities for deep utilization;

- obtained data of convective low-temperature heating surfaces cleaning frequency when using water-fuel emulsions, which confirm its increase in 2...3 times and corresponding reduction of operating costs compared with exploitation of natural fuels.

The implementation of developed recommendations in the design practice allows to improve characteristics of exhaust gas boilers and heat recovery circuits of cogeneration units, to obtain more reliable their values depending from fuel composition and CEU operating modes.

Key words: water-fuel emulsions, exhaust gas boiler, cogeneration unit, condensing heating surface, low-temperature corrosion, pollution.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

1. Корниенко В.С. Интенсивность процессов загрязнения поверхностей нагрева утилизационных котлов при сжигании водомазутных эмульсий. Авиационно-космическая техника и технология. 2017. № 1 (136). С. 48–53.

2. Корниенко В.С., Радченко А.Н., Андреев А.А., Щербак Ю.Г. Влияние загрязнения на тепловую эффективность поверхностей нагрева утилизационных котлов при использовании водотопливных эмульсий на основе маловязких топлив. Авиационно-космическая техника и технология. 2018. №2 (146). С.28–32.

Особистий внесок: удосконалення методики визначення коефіцієнта теплової ефективності поверхонь нагріву утилізаційних котлів.

3. Корнієнко В.С. Вплив забруднення поверхонь нагрівання на інтенсивність теплопередачі в утилізаційних котлах при спалюванні водопаливних емульсій. Вісник Приазовського державного технічного університету. Сер. Технічні науки. 2017. вип.35. С. 78–86.

4. Корниенко В.С. Исследование работы ротационных форсунок. Авиационно-космическая техника и технология. 2013. № 8 (105). С. 142–146.

5. Горячкин В.Ю., Корниенко В.С. Интенсивность коррозионных процессов в утилизационных котлах при сжигании водотопливных эмульсий. Вестник АГТУ. Сер. Морская техника и технология. 2013. №2. С. 101–110.

Особистий внесок: розробка математичної моделі визначення інтенсивності корозії поверхонь нагріву утилізаційних котлів.

6. Радченко А.М., Андреев А.А., Корнієнко В.С. Забруднення поверхонь нагріву утилізаційних котлів при спалюванні водопаливних емульсій на основі малов'язких палив. Авиационно-космическая техника и технология. 2018. № 1 (145). С. 43-47.

Особистий внесок: розробка математичної моделі визначення інтенсивності забруднення поверхонь нагріву утилізаційних котлів.

7. Спосіб захисту металу низькотемпературних поверхонь нагріву котла від сірчаноокислотної корозії: пат. 99408 Україна: МПК C23F 11/10, F22B 37/00, F23J 15/00 / Горячкін В.Ю., Горячкін А.В., Акімов О.В., Іутінський В.О., Корнієнко В.С.; № 201110299; заявл. 23.08.11; опубл. 10.08.12, Бюл. № 15.

Особистий внесок: розробка і аналіз механізму процесу пасивації поверхонь нагріву утилізаційних котлів від низькотемпературної сірчаноокислотної корозії.

8. Спосіб підготовки водопаливної емульсії для енергетичних установок, в яких спалюється сірчисте органічне паливо: пат. 115037 Україна: МПК B01D 53/60, B01D 53/14, F02B 47/02, F02M 25/022, F23D 11/16 / Горячкін В.Ю., Горячкін А.В., Акімов О.В., Корнієнко В.С., Філіпчук О.М., Тендітний Ю.Г.; №201402318; заявл. 06.03.14; опубл. 11.09.17, Бюл. № 17.

Особистий внесок: розробка схемно-конструктивних рішень системи очищення відхідних газів конденсаційними поверхнями нагріву утилізаційних котлів.

9. Корниенко В.С. Исследование динамики низкотемпературной коррозии и загрязнения поверхностей нагрева утилизационных котлов. Рыбне господарство України. 2013. №3(86). С. 62–65.

10. Корниенко В.С. Возможности комплексной утилизации теплоты судовых ДВС. Всеукраїнський форум молодих науковців "Макаровські читання". Миколаїв: НУК, 2012 р. С. 23–24.

11. Корнієнко В.С. Підвищення ефективності утилізації теплоти вихлопних газів ДВЗ при спалюванні водомазутних емульсій і при використанні судових прямооточних котлів. Інновації в суднобудуванні та океанотехніці: матеріали II Міжнародної науково-технічної конференції. Миколаїв: НУК, 2011. С. 200–203.

12. Корнієнко В.С. Інтенсивність низькотемпературної корозії в утилізаційних котлах при спалюванні водопаливних емульсій. Всеукраїнський форум молодих науковців "Макаровські читання". Миколаїв: НУК, 2013. С. 12-13.

13. Горячкін В.Ю., Андреев А.А., Корнієнко В.С. Ефективність допалювання водопаливних емульсій перед утилізаційними котлами. Сучасні інформаційні і іноваційні технології на транспорті: матеріали Міжнародної науково-практичної конференції. Херсон: ХДМІ, 2017. С. 67-69.

Особистий внесок: удосконалення методики і проведення розрахунків теплоутилізаційних контурів при допалюванні палива перед утилізаційним котлом.

14. Горячкін В.Ю., Андреев А.А., Корнієнко В.С. Влияние загрязнения конденсационных поверхностей нагрева на интенсивность теплопередачи. Всеукраїнська науково-практична конференція молодих учених, спеціалістів, аспірантів «Проблеми енергоресурсозбереження в промисловому регіоні. Наука і практика»: Зб. тездоповідей. Маріуполь: ДВНЗ «ПДТУ», 2017. С. 100-102.

Особистий внесок: проведення розрахунків і аналіз результатів визначення коефіцієнта забруднення поверхонь нагріву утилізаційних котлів.

15. Горячкин В.Ю., Корниенко В.С. Эффективность энергосбережения при сжигании сернистых водотопливных эмульсий. Іновації в суднобудуванні та океанотехніці: матеріали Міжнародної науково-технічної конференції. Миколаїв: НУК, 2017. С.198-199.

Особистий внесок: удосконалення методики визначення коефіцієнтів теплової ефективності конденсаційних поверхонь нагріву утилізаційних котлів.

16. Горячкін В.Ю., Андреев А.А., Корнієнко В.С. Возможности применения конденсационных поверхностей нагрева при сжигании сернистых водотопливных эмульсий. Суднова енергетика: стан та проблеми: матеріали VIII Міжнародної науко-технічної конференції. Миколаїв: НУК, 2017. С.359-363.

Особистий внесок: аналіз можливостей використання конденсаційних поверхонь нагріву в утилізаційних котлах.

17. Горячкін В.Ю., Горячкін А.В., Іутінський В.О., Кондя В.С. Підвищення ефективності утилізації теплоти сучасних дизельних енергетичних

установок. Сучасні інформаційні і іноваційні технології на транспорті: матеріали Міжнародної науково-практичної конференції. Том 2. Херсон: ХДМІ, 2010. С. 193–196.

Особистий внесок: аналіз існуючих схем утилізації теплоти енергетичних установок.

18. Горячкин В.Ю., Андреев А.А., Корниенко В.С. Когенерационные установки с ДВС. Муніципальна енергетика: проблеми, рішення: матеріали IV Міжнародної науково-технічної конференції. – Миколаїв: НУК, 2011. С. 194–197.

Особистий внесок: розробка схемно-конструктивних рішень когенераційних установок.

19. Горячкин В.Ю., Горячкин А.В., Іутінський В.О., Корнієнко В.С. Эффективный способ защиты металла низкотемпературных поверхностей нагрева котла от сернистой коррозии. Інновації в суднобудуванні та океанотехніці: матеріали III Міжнародної науково-технічної конференції. Миколаїв: НУК, 2012. С. 253–255.

Особистий внесок: аналіз механізмів захисту металу від низкотемпературної сірчаноокислотної корозії при використанні водопаливних емульсій.

20. Горячкин В.Ю., Горячкин А.В., Новиков В.И., Корниенко В.С. Исследования кинетики низкотемпературной коррозии и загрязнения поверхностей нагрева УК. Інновації в суднобудуванні та океанотехніці: матеріали III Міжнародної науково-технічної конференції. Миколаїв: НУК, 2012. С. 280–281.

Особистий внесок: розробка математичної моделі визначення кінетики процесів корозії і забруднення.

21. Горячкин В.Ю., Горячкин А.В., Корниенко В.С. Эффективность утилизации теплоты ДВС при дожиге топлива перед УК. Інновації в суднобудуванні та океанотехніці: матеріали III Міжнародної науково-технічної конференції. Миколаїв: НУК, 2012. С.256–257.

Особистий внесок: аналіз існуючих схем розрахунку теплоутилізаційних контурів з допалюванням палива перед утилізаційним котлом.

22. Горячкин В.Ю., Андреев А.А., Корниенко В.С. Загрязнение конденсационных поверхностей нагрева утилизационных котлов при сжигании водомазутных эмульсий. Іновації в суднобудуванні та океанотехніці: матеріали Міжнародної науково-технічної конференції. Миколаїв: НУК, 2016. С.136-137.

Особистий внесок: розробка математичної моделі визначення інтенсивності забруднення поверхонь нагріву утилізаційних котлів.

23. Горячкин В.Ю., Андреев А.А., Корниенко В.С. Улучшение экологических показателей при установке конденсационных поверхностей в утилизационных котлах. Іновації в суднобудуванні та океанотехніці: матеріали Міжнародної науково-технічної конференції. Миколаїв: НУК, 2016. С.281-282.

Особистий внесок: аналіз можливостей застосування конденсаційних поверхонь нагріву утилізаційних котлів в системах очищення відхідних газів.

Праці [1–4, 6] опубліковано у виданнях, які входять до міжнародної наукометричної бази даних Index Copernicus, [5] – до наукометричної бази даних РІНЦ.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	20
ВСТУП.....	23
РОЗДІЛ 1. Аналіз літературних даних з ефективності процесів в когенераційних установках при використанні сірчистих палив.....	31
1.1 Аналіз ефективності існуючих способів утилізації теплоти в когенераційних установках.....	31
1.2 Екологічні показники роботи різних схем когенераційних установок.....	39
1.3 Вплив токсичних компонентів і твердих часток в газах на інтенсивність корозії і забруднення поверхонь нагріву утилізаційних котлів.....	43
1.4 Особливості низькотемпературної корозії і забруднення поверхонь нагріву.....	46
1.5 Обґрунтування напряму, постановка мети і завдань дослідження.....	54
Висновки по розділу 1.....	55
РОЗДІЛ 2. Обґрунтування та розробка методологічної бази дослідження ефективності утилізації теплоти в когенераційних установках при використанні водопаливних емульсій.....	57
2.1 Методика проведення експериментальних і аналітичних досліджень.....	57
2.2 Методика визначення швидкості корозії і забруднення.....	68
2.3 Визначення теплового опору шару забруднень.....	69
2.4 Визначення енергетичних та екологічних показників когенераційних установок.....	71
Висновки по розділу 2.....	76
РОЗДІЛ 3. Дослідження процесів корозії і забруднення поверхонь нагріву утилізаційних котлів при використанні водопаливних емульсій.....	77
3.1 Кінетика процесів корозії і забруднення.....	77
3.2 Інтенсивність корозійних процесів низькотемпературних поверхонь нагріву.....	80

3.3 Інтенсивність процесу забруднення низькотемпературних поверхонь нагріву.....	89
Висновки по розділу 3.....	98
РОЗДІЛ 4. Особливості теплопровідності при використанні водопаливних емульсій.....	99
4.1 Еквівалентна теплопровідність в шарі забруднень.....	99
4.2 Особливості конвективного теплообміну при використанні водопаливних емульсій.....	109
Висновки по розділу 4.....	118
РОЗДІЛ 5. Вплив забруднення поверхонь нагріву на інтенсивність теплопередачі в утилізаційних котлах при використанні водопаливних емульсій.....	119
5.1 Визначення термічного опору шару забруднень на поверхнях нагріву.....	119
5.2 Визначення коефіцієнтів забруднення.....	122
5.3 Визначення періодичності очищення поверхонь нагріву.....	129
Висновки по розділу 5.....	131
РОЗДІЛ 6. Розробка та аналіз ефективності застосування схемо-технічних рішень контурів утилізації теплоти в когенераційних установках при використанні водопаливних емульсій.....	133
6.1 Ефективність використання водопаливних емульсій в дизель-генераторах когенераційних установок.....	133
6.2 Результати досліджень характеристик різних схем і конструкцій утилізаційних котлів.....	149
6.3. Створення комплексної системи очищення газів.....	152
Висновки по розділу 6.....	155
ВИСНОВКИ.....	157
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ.....	159
Додаток А. Статистична обробка експериментальних даних.....	175
Додаток Б. Список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації.....	183
Додаток В. Документи, що засвідчують впровадження результатів роботи...	189

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

СКОРОЧЕННЯ

БПЦ – багатократно примусова циркуляція;
ВК – водогрійний котел;
ВОД – високообертвий двигун;
ВПЕ – водопаливні емульсії;
Г – електрогенератор;
ГВП – гаряче водопостачання;
ГПК – газовий підігрівач конденсату;
ГРМ – гвинтова розширювальна машина;
ГТУ – газотурбінна установка;
ГТД – газотурбінний двигун;
ГТУ – паротурбінна установка;
ДВЗ – двигун внутрішнього згорання;
ДГ – дизель-генератор;
ДЕС – дизельна електростанція;
ДП – дизельне паливо;
ЕК – економайзер;
КВТ – коефіцієнт використання теплоти палива;
КЕУ – когенераційна енергетична установка;
ККД – коефіцієнт корисної дії;
НТЗ – низькотемпературні забруднення;
НТК – низькотемпературна корозія;
НТПН – низькотемпературна поверхня нагріву;
ОНП – охолоджувач наддувного повітря;
ПГУ – парогазова установка;
ПЕ – перегрівник;
ПЕД – паливо екологічно чисте дизельне;

ПТ – парова турбіна;
 ПУ – пароутворююча поверхня;
 СДП – система допалювання палива;
 СОД – середньобертовий двигун;
 СЧ – сажові частки;
 ТЕС – теплова електростанція;
 ТЕЦ – теплоелектроцентрально;
 ТУК – теплоутилізаційний контур;
 УК – утилізаційний котел;
 УТГ – утилізаційний турбогенератор.

ПОЗНАЧЕННЯ

b_e – питома витрата палива, кг/(кВт·год);
 D – паропроодуктивність, кг/с;
 d – зовнішній діаметр трубки, м;
 F – площа поверхні зразка, поверхні нагріву, м²;
 ΔG_k – питома втрата маси металу внаслідок корозії, г/м²;
 ΔG_k – питома маса забруднення, г/м²;
 k_3 – коефіцієнт теплопередачі, Вт/(м²·К);
 K – швидкість корозії, г/(м²·год), мм/рік;
 K_3 – швидкість забруднення, г/(м²·год), мм/рік;
 $K_{\text{ц}}$ – кратність циркуляції у котлі;
 N_e – ефективна потужність двигуна, МВт;
 p – тиск води і пари, МПа;
 Q – теплова потужність, МВт;
 Δt – температурний напір, К;
 $\Delta t_{\text{сер}}$ – середньологарифмічна різниця температур між середовищами, К;
 R^2 – коефіцієнт детермінації;
 S^r – вміст сірки в паливі і емульсії, %;

$t_{\text{ст}}$ – температура стінки, °C;

w_{Γ} – швидкість газів, м/с;

W^r – вміст води в паливі і емульсії, %;

α – коефіцієнт надлишку повітря;

α_1 – коефіцієнт тепловіддачі від газів до стінки, Вт/(м²·К);

δ_3 – товщина забруднення, мм;

$\delta_{\text{м}}$ – товщина металу, мм;

φ – коефіцієнт збереження теплоти;

$\vartheta_{\text{вих}}$ – температура відхідних газів, °C;

τ – час проходження процесу, год;

ВСТУП

Актуальність дослідження. В когенераційних енергетичних установках (КЕУ), в яких немає можливості спалювати газоподібне паливо, використовують рідкі сірчисті палива, включно з важкими їх сортами, зокрема при застосуванні в якості дизель-генераторів сучасних суднових середньообертових двигунів, які можуть працювати і на мазуті. Такі дизель-генератори відзначаються низькими питомими витратами палива, а їх ефективний ККД досягає 45 %. При цьому втрати теплоти з відхідними газами на рівні 25...27 %, наддувним повітрям – 15...17 %, охолоджуючою двигуни водою – близько 5 %, з маслом – 2 %.

При температурному напорі $\Delta t = 30$ °С температура газів на виході з УК становить приблизно 160 °С, що пов'язано зі зростанням інтенсивності низькотемпературної корозії (НТК) до 1,2 мм/рік при температурах стінки вище 130 °С. При цьому одночасно зростає інтенсивність забруднення низькотемпературних поверхонь нагріву (НТПН), внаслідок чого знижується інтенсивність теплопередачі в поверхнях нагріву, зростає аеродинамічний опір УК.

Ефективність використання теплоти спалювання палива може бути підвищена шляхом глибокого охолодження продуктів згоряння нижче температури точки роси, що є практично єдиною можливістю зниження температури відхідних газів утилізаційного котла (УК) при одночасному забезпеченні надійності роботи, екологічності та економічності КЕУ.

Накопичений досвід використання водопаливних емульсій (ВПЕ) в котлах та двигунах вказує на безперечні переваги цього виду палива: знижується ефективна питома витрата палива приблизно на 8 %, у відпрацьованих газах суттєво зменшується концентрація оксидів азоту в 1,4...3,1 рази, концентрація СО – в 1,3...1,5 рази, знижується димність в 1,3...2,4 рази.

Опубліковані кількісні залежності швидкості НТК від температури стінки $t_{ст}$ при використанні ВПЕ з водовмістом W^r до 30 % при значеннях коефіцієнта надлишку повітря α до 1,5 і вмісту сірки S^r до 1,8 % вказують на відсутність корозійного піку при $t_{ст} = 110$ °С і можливість зниження температури стінки $t_{ст}$ до 70 °С при допустимій швидкості НТК на рівні 0,25 мм/рік. У цьому випадку з'являється можливість встановити конденсаційні поверхні нагріву на виході газів з УК і збільшити глибину утилізації. Однак кількісні дані щодо швидкості НТК при значеннях надлишку повітря в діапазоні $\alpha = 1,5 \dots 3,0$, в якому саме і експлуатується УК, практично відсутні.

В нормативних документах розрахунку конвективних поверхонь нагріву відсутні також дані щодо визначення коефіцієнта забруднення ε_z для сухих і конденсаційних поверхонь нагріву при використанні ВПЕ.

Спалювання додаткового палива у вигляді ВПЕ в газоході перед УК забезпечує: 1) збільшення енергії відхідних газів після двигуна КЕУ; 2) збільшення температурного напору Δt в УК; 3) економію вихідного палива за рахунок використання теплоти допалювання горючих компонентів відхідних газів (коксових і сажових часток, вуглеводнів, СО, бензапирена); 4) підвищення параметрів пари в УК, що дає можливість збільшити ККД КЕУ з паровою турбіною, а отже зменшити витрати палива на КЕУ. Для підвищення ефективності теплоутилізаційних контурів (ТУК) і характеристик УК в якості палива, що додатково допалюється перед УК, доцільно дослідити використання ВПЕ з водовмістом до 30 %, що дає можливість підвищити параметри пари, що виробляється в УК, і скоротити витрати вихідного палива в КЕУ.

Таким чином, актуальність дослідження зумовлена тим, що аспекти вирішення проблеми корозії і забруднення НТПН при використанні сірчистих ВПЕ з надлишками повітря α більше 1,5, а також визначення термічного опору шару забруднень при використанні різних палив і ВПЕ розроблені недостатньо.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконана відповідно до пріоритетних напрямів розвитку науки і техніки України "Новітні технології та ресурсозберігаючі технології в енергетиці,

промисловості та агропромисловому комплексі" (напрямок 6), зокрема у рамках науково-дослідної теми №0111U002309 "Теоретичні основи підвищення стійкості процесів горіння вуглеводневих палив в низькоемісійних камерах згоряння газотурбінних двигунів використанням плазмохімічних стабілізаторів", а також плану НДР обласної програми з енергозбереження, затвердженої на сесії Херсонської обласної Ради №320 від 12.12.2000 р. У цих роботах здобувач приймала участь як виконавець на посаді молодшого наукового співробітника.

Мета наукового дослідження - підвищення техніко-економічної ефективності роботи утилізаційних котлів і теплоутилізаційних контурів когенераційних установок за рахунок інтенсифікації теплообміну та зменшення швидкості процесів низькотемпературної корозії і забруднення поверхонь нагріву, зниження емісії шкідливих речовин в атмосферу при використанні водопаливних емульсій.

Основні задачі наукового дослідження:

- експериментальні дослідження процесів корозії і забруднення низькотемпературних поверхонь нагріву утилізаційних котлів при коефіцієнтах надлишку повітря $\alpha = 1,5 \dots 3,0$, що визначають інтенсивність теплообміну, глибину утилізації теплоти відхідних газів і надійність експлуатації теплоутилізаційних контурів когенераційних установок;

- дослідження впливу коефіцієнта надлишку повітря α , водовмісту емульсії W^r і вмісту сірки в паливі S^r на інтенсивність низькотемпературної корозії і забруднення;

- теоретичне обґрунтування прогнозування низькотемпературної корозії і забруднення на основі статистичних даних і результатів експериментальних досліджень при коефіцієнтах надлишку повітря $\alpha = 1,5 \dots 3,0$;

- визначення мінімального значення температури стінки $t_{ст}^{min}$, при якому забезпечується допустима швидкість низькотемпературної корозії на рівні

0,25 мм/рік і мінімальне значення температури відхідних газів $\vartheta_{\text{вих}}^{\Gamma}$ на виході з утилізаційного котла;

- визначення необхідної періодичності очищення поверхонь нагріву утилізаційних котлів;
- визначення екологічних і економічних показників розроблених теплоутилізаційних контурів когенераційних установок.

Об'єктом дослідження є теплоутилізаційний контур когенераційної установки при використанні водопаливних емульсій.

Предмет дослідження – процеси теплообміну, фізико-хімічні процеси корозії і забруднення при використанні водопаливних емульсій в когенераційній установці.

Методи дослідження - експериментально-теоретичні: експериментальні дослідження процесів осадження твердих зольних і коксових часток з потоку відхідних газів на низькотемпературні поверхні нагріву котлів, корозії металу і забруднення низькотемпературних поверхонь нагріву при температурах стінки $t_{\text{ст}}$ нижче температури точки роси пари сірчаної кислоти; теоретичне обґрунтування впливу коефіцієнта надлишку повітря α і температури стінки $t_{\text{ст}}$ на величину швидкості корозії і забруднення; методи математичного планування експерименту; методи регресійного аналізу результатів досліджень корозії і забруднення низькотемпературних поверхонь нагріву; аналіз схемно-конструктивних рішень виконувався з використанням програмних комплексів ЕОМ.

Теплотехнічні вимірювання параметрів проводилися стандартними методами; при постановці дослідів використано загальну теорію моделювання і планування експериментів, а при обробці даних і перевірці гіпотез – статистичний аналіз.

Наукові результати, які автор захищає, та їх **новизна**:

Вперше:

- отримані напівемпіричні залежності питомої втрати маси металу від вмісту сірки у вихідному паливі

$\Delta G_k = f(S^r)$ і коефіцієнта надлишку повітря $\Delta G_k = f(\alpha)$ при температурах стінки $t_{ст}$ нижче температури точки роси пари сірчаної кислоти $t_{p\ H_2SO_4}$, які характеризують інтенсивність низькотемпературної корозії конденсаційних поверхонь нагріву на різних режимах роботи утилізаційних котлів $t_{p\ H_2SO_4}$;

- отримані напівемпіричні залежності питомої маси забруднення від водовмісту емульсії $\Delta G_3 = f(W^r)$, вмісту сірки у вихідному паливі $\Delta G_3 = f(S^r)$ і коефіцієнта надлишку повітря $\Delta G_3 = f(\alpha)$ при температурах стінки $t_{ст}$ нижче температури точки роси пари сірчаної кислоти $t_{p\ H_2SO_4}$, що дозволяють визначати аеродинамічний опір конденсаційних поверхонь нагріву і періодичність їх очищення;

- розроблена тривимірна модель і отримане рівняння регресії, які описують інтенсивність корозії $\Delta G_k = f(W^r; S^r; \alpha)$ низькотемпературних поверхонь нагріву, що дають можливість розраховувати мінімальне значення температури стінки як умови надійної експлуатації конденсаційних поверхонь нагріву;

- розроблена тривимірна модель і отримане рівняння регресії, які описують інтенсивність забруднення $\Delta G_3 = f(W^r; S^r; \alpha)$ низькотемпературних поверхонь нагріву і дають змогу обчислювати коефіцієнт забруднення конденсаційних поверхонь нагріву утилізаційних котлів;

- отримані залежності коефіцієнтів забруднення ε_3 для конденсаційних низькотемпературних поверхонь нагріву від швидкості газів, водовмісту водопаливної емульсії W^r , і температури стінки $t_{ст}$, що дозволяють визначити періодичність очищення сухих і конденсаційних поверхонь нагріву, які забезпечують оптимальні теплотехнічні показники утилізаційних котлів;

- розроблена тривимірна модель і отримане рівняння регресії, які описують коефіцієнт забруднення $\varepsilon_3 = f(t_{ст}, W^r, w_r)$ і дають можливість розраховувати інтенсивність теплообміну в сухих і конденсаційних поверхнях нагріву утилізаційних котлів при їх проектуванні.

Достовірність результатів досліджень забезпечена коректною

постановкою науково-прикладного завдання, застосуванням фізично і математично обґрунтованих методів вирішення поставлених завдань досліджень, задовільним узгодженням отриманих результатів досліджень на експериментальній установці з даними випробувань на діючих котлах при практично однакових умовах горіння; результатами порівняльного аналізу запропонованих технічних рішень.

Практичну цінність становлять результати дослідження:

- рекомендації з визначення інтенсивності низькотемпературної корозії і забруднення та періодичності очищення сухих і конденсаційних низькотемпературних поверхонь нагріву в залежності від складу палива і режимів його спалювання, що забезпечують надійну експлуатацію поверхонь нагріву;

- методика розрахунку коефіцієнтів забруднення ε_3 сухих і конденсаційних поверхонь нагріву утилізаційних котлів в залежності від швидкості газів, коефіцієнта надлишку повітря α , вмісту сірки в паливі S^r , водовмісту водопаливної емульсії W^r і температури стінки $t_{ст}$, що дозволяє проводити конструктивні розрахунки конвективних поверхонь нагріву;

- рекомендації з визначення коефіцієнтів забруднення ε_3 для сухих і конденсаційних низькотемпературних поверхонь нагріву в залежності від швидкості газів, коефіцієнта надлишку повітря α , вмісту сірки в паливі S^r , водовмісту водопаливної емульсії W^r і температури стінки $t_{ст}$ при проектуванні конвективних поверхонь нагріву утилізаційних котлів;

- визначений діапазон температури стінки $t_{ст}$ за безпечної експлуатації конденсаційних низькотемпературних поверхонь нагріву, що відкриває можливості для глибокої утилізації;

- отримані дані щодо періодичності очищення конвективних низькотемпературних поверхонь нагріву при використанні водопаливних емульсій, які підтверджують її збільшення в 2...3 рази і відповідне скорочення експлуатаційних витрат порівняно з експлуатацією на природних паливах.

Впровадження розроблених рекомендацій у практику проектування

дозволяє поліпшити характеристики утилізаційних котлів і теплоутилізаційних контурів когенераційних установок, одержувати більш достовірні їх значення в залежності від складу палива і режимів роботи когенераційної установки.

Впровадження результатів досліджень. Результати дисертаційної роботи у вигляді методики розрахунку характеристик тепломасообмінних процесів в УК, теплоутилізаційних контурів КЕУ, рекомендацій з експлуатації КЕУ при спалюванні ВПЕ використовуються в організаціях: ТОВ "ГК Теплотехніка", ТОВ "Хладотехніка", ТОВ "Смарт-Мерітайм Груп" (м. Херсон). Розроблена математична модель визначення інтенсивності корозії і забруднення НТПН, розрахунків значень коефіцієнтів забруднення ε_z , коефіцієнтів теплопередачі використовуються в навчальному процесі Херсонської філії Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова при виконанні дипломних проектів і магістерських робіт зі спеціальності "Теплоенергетика".

Особистий внесок здобувача. Основні наукові результати, висновки і рекомендації, що представлені в дисертації та виносяться на захист, отримані автором самостійно та опубліковані в 7 наукових працях. В 16 роботах, що опубліковані у співавторстві, здобувачем розроблені математичні моделі процесів визначення коефіцієнтів пористості забруднення, еквівалентної теплопровідності пористого шару забруднень на конденсаційних поверхнях нагріву УК, проведено аналіз результатів експериментальних досліджень та обґрунтування достовірності одержаних результатів наукових досліджень*.

Апробація результатів роботи. Основні результати дисертаційних досліджень доповідалися й були позитивно оцінені на V, VI і VIII Міжнародних техн. конф. "Суднова енергетика: стан і проблеми" (Миколаїв, НУК, 2011 р., 2013 р., 2017 р.); на IV Міжнародній техн. конф. "Муніципальна енергетика: проблеми, рішення" (Миколаїв, НУК, 2011 р.); на Всеукраїнському форумі

* Деякі дослідження проведені при консультації та за участі Радченка Р.М., к.т.н., доцента НУК.

молодих учених, присвяченому Дню науки "Макаровські читання" (Миколаїв, НУК, 2012 р., 2013 р.); на IV і VI Міжнародних техн. конф. "Інновації в суднобудуванні й океанотехніці" (Миколаїв, НУК, 2013 р., 2015 р.); MINT (Херсон, ХДМА, 2010 р., 2017 р.), Всеукраїнська науково-практична конференція молодих учених, спеціалістів, аспірантів "Проблеми енергоресурсозбереження в промисловому регіоні. Наука і практика" (Маріуполь, ДВНЗ "ПДТУ", 2017).

Публікації. За матеріалами дисертації опубліковано 23 наукових праць, з них 6 наукових статей у спеціалізованих наукових виданнях по технічним наукам, що входять у перелік, затверджений ДАК МОН України, 6 з яких опубліковано в виданнях, включених до міжнародних наукометричних баз, 2 патенти України на винахід і 15 тез міжнародних і всеукраїнських конференцій.

Структура дисертації. Дисертація складається із переліку умовних позначень, вступу, 6 розділів, висновків, 2 додатків та списку використаних джерел. Обсяг дисертаційної роботи становить 160 сторінок, рисунків – 81. Список використаних джерел містить 152 найменувань на 17 сторінках.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДАНИХ З ЕФЕКТИВНОСТІ ПРОЦЕСІВ В КОГЕНЕРАЦІЙНИХ УСТАНОВКАХ ПРИ ВИКОРИСТАННІ СІРЧИСТИХ ПАЛИВ

1.1 Аналіз ефективності існуючих способів утилізації теплоти в когенераційних установках

Починаючи з 2005 р, внаслідок подорожчання природного газу і мазуту і прийнятої політики щодо переведення енергетики країни на власні паливні ресурси, проблеми ефективного його використання і природоохоронної діяльності стають більш актуальними.

Привабливість технології виробництва електричної та теплової енергії на основі застосування газотурбінних і поршневих двигунів (дизельних і газових) в КЕУ полягає в тому, що можна у відносно короткі терміни отримати одночасно джерела електричної енергії і теплоти з відносно високим коефіцієнтом використання теплоти палива (КВТ) [130]. В [15] відзначається, що когенерація - це комбіноване виробництво теплоти й електроенергії з використанням в термодинамічному циклі робочого тіла з більш високою середньою початковою температурою і утилізацією теплоти робочого тіла в високотемпературній частині термодинамічного циклу.

У законі України "Про комбіноване виробництво теплової та електричної енергії (когенерацію) та використання скидного енергопотенціалу" [76] термін "когенерація" визначається як "спосіб одночасного виробництва електричної і теплової енергії в рамках одного технологічного процесу в результаті використання палива" [15].

Прогнозовані показники індикаторів стратегічного розвитку теплопостачання населених пунктів України, що наведені у трьох незалежних документах (що мають регуляторний характер) - Теплостратегія (ІТТФ НАН

України), ЕС-35 (НІСД) і НЕС-2020 (ЦР) [68], згідно яких в паливноенергетичному балансі об'єми нафтопродуктів складають 11,5 и 12,2 %. Тому можливе використання нафтопродуктів (особливо, якщо термін зберігання їх вичерпаний) в двигунах КЕУ. У розвинених країнах світу близько 10 % (а в деяких і до 25 %) електроенергії для приватного споживання виробляється засобами малої енергетики [137].

У численних когенераційних технологіях і схемах їх реалізації передбачається використання різних теплових двигунів. Останнім часом різними споживачами енергії проявляється підвищений інтерес до автономних енергетичних установок, в яких первинним джерелом енергії є газопоршневий двигун. Такі установки мають безперечні переваги: відносно низькі питомі капітальні витрати, короткі терміни монтажу, швидкий запуск, простоту обслуговування, високий ККД при часткових навантаженнях, мобільність.

Питома витрата палива на виробництво електроенергії установкою з газопоршневим двигуном приблизно на 25 % менше, ніж установкою з газотурбінним двигуном (ГТД), причому на будь-якому режимі. Це пояснюється тим, що ККД у поршневих машин становить 36...45 %, а у газових турбін 25...34 %. Коефіцієнт використання палива найбільш економічних газопоршневих електростанцій становить 35...38%, то для міні-ТЕЦ він досягає 85...87% [62].

На думку [14] у зв'язку з різними варіантами споживання енергії, що виробляється в КЕУ, можлива реалізація схемного рішення на базі різного типу обладнання. При використанні двигунів внутрішнього згорання (ДВЗ) в КЕУ теоретично вся енергія теплових втрат, за виключенням радіаційних і конвективних втрат теплоти власне від двигуна, може бути корисно використана, що і забезпечує високу ефективність використання палива [61]. Як правило, такі ДВЗ розроблені на основі тепловозних або суднових двигунів. Тому можливе використання і високоекономічних суднових ДВЗ. За даними [130] для теплової електростанції (ТЕС) малої потужності найбільш придатні середньообертові двигуни (СОД), частота обертання яких складає зазвичай

500...900 хв⁻¹. Їх максимальна потужність близько 10 МВт: на ТЕС встановлені 18-циліндрові ДГ Wartsila 32DF при роботі на газі і дизельному паливі (ДП) з ККД відповідно 41,6 і 40,5 %. Фахівці цієї фірми розробили нову серію двигунів для роботи на газі або малов'язкому рідкому паливі (DF), в якому може міститися до 1 % сірки. Найпотужніший з них 18V50DF - 17,1 МВт. Викиди NO_x (при 5 % O₂) – 500 мг/м³, CO – 420 мг/м³, ККД – 47 %.

Основні показники ефективності КЕУ представлені в [15] (рис. 1.1).



Рис. 1.1 Основні показники ефективності КЕУ

Використання ВПЕ привертає увагу дослідників і експлуатаційників можливістю одночасного вирішення ряду завдань – підвищення економічності ДВЗ, зменшення нагароутворення, димності і токсичності відпрацьованих газів, зниження рівня шуму [25, 75, 111]. В ході експериментальних досліджень [133] встановлено, що додавання до палива 5...10 % води прискорює процес згоряння в 5...6 разів. Під час проведення випробувань головних суднових дизелів 6ДКРН74/160-3 оптимальний водовміст ВПЕ, що готувався на базі зарубіжного мазуту IFO-40, IFO-180, підтримувався в межах 17...25 %, витрата палива при цьому знижувалась на 12...15 %. При проведенні випробувань

роботи ДГ з приводним двигуном 6ЧН25/34 на стенді Первомайського дизелебудівного заводу водовміст ВПЕ досягав 50 % [133]. Аналіз випробувань, проведених на 25 двигунах різної конструкції з використанням як дизельного, так і важких сортів палив, показав [25], що в більшості випадків максимальна економія палива досягається при концентрації води у ВПЕ 10...20 % (рис. 1.2). Максимальне значення економії палива 8,2 % досягнута при концентрації води в паливі 18 %. Зниження нагару на деталях циліндрово-поршневої групи і газовихлопному тракті склало 43 %, відкладення стали більш рихлі, пористі і легковидаляемі. Істотно знизилася димність вихлопу. Це дозволило збільшити період між моточищеннями з 4000 до 7000 год.



Рис. 1.2. Максимальні значення економії палива, що досягнуті на двигунах різних конструкцій:

1 – ДВЗ з роздільною камерою згоряння; 2 – ДВЗ з нероздільною камерою згоряння, на легкому паливі; 3 – те ж саме, на важкому паливі

У [116, 115] представлені докладні дані результатів досліджень використання ВПЕ в високооберткових двигунах (ВОД), які можуть бути використані в КЕУ: розглянуто ВОД типу 4ЧН 12/14 (СМД-19Т) ($N_e = 100$ кВт, $n = 1000 \dots 2000$ хв⁻¹, $b_e = 220$ г/кВт·год). Дизель досліджувався за навантажувальними характеристиками при частотах обертання колінчатого валу $n = 1000, 1500, 2000$ хв⁻¹ на дизельному паливі (ДП) і паливі екологічно чистому дизельному (ПЕД), що представляє собою ВПЕ на основі ДП і води з

емульгатором. ВПЕ є системою, що включає в себе воду, яка є дисперсною фазою з діаметром крапель 0,1...10 мкм, і паливо, що є дисперсним середовищем. Застосування ВПЕ не вимагає конструктивних переробок дизеля і дозволяє помітно поліпшити екологічні характеристики ДВЗ.

На графіках (рис. 1.3, а, б) [115] наведено залежності годинних витрат ДП і ПЕД від вмісту води в ПЕД на режимах максимальної потужності дизеля за зовнішньою характеристикою при $n = 2000, 1500$ і 1000 хв⁻¹, які показують, що зі збільшенням вмісту води годинна витрата ПЕД зростає (рис. 1.3, а), але витрата органічного ДП в ПЕД при збільшенні вмісту води зменшується (рис. 1.3, б). Найбільш ефективно з точки зору економії ДП використання ПЕД із вмістом води 15...25 %.

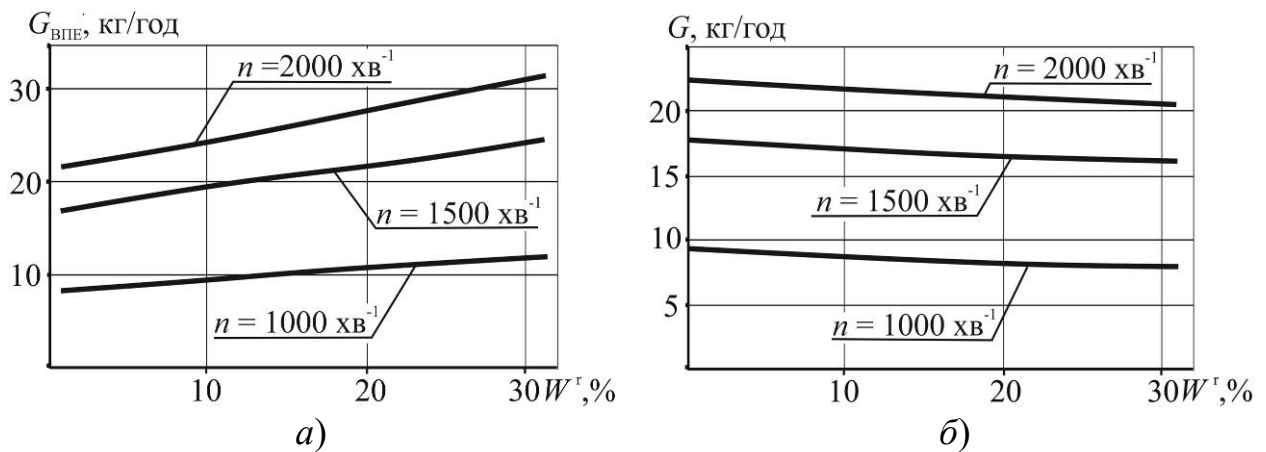


Рис. 1.3. Залежності годинних витрат ПЕД (а) і ДП (б) від вмісту води в ПЕД

Позитивний вплив води на згоряння ДП підтверджується залежностями ефективного ККД при максимальній потужності від W^r в ПЕД (рис. 1.4).

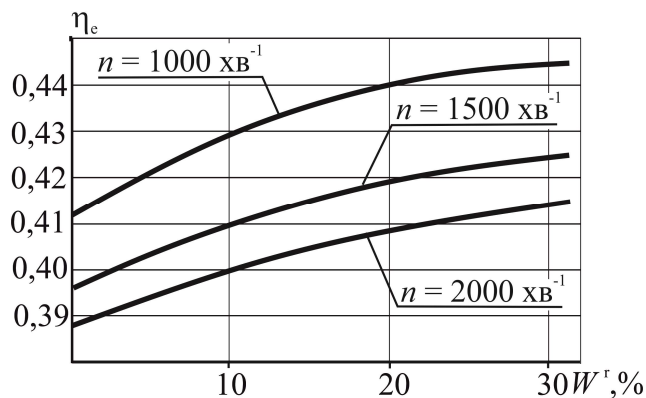


Рис. 1.4. Залежності ефективного ККД ВОД від вмісту води в ПЕД

ВПЕ отримують в гомогенізаторах і диспергаторах при використанні технології дискретно-імпульсного введення енергії (ДІВЕ) [66] для забезпечення максимально можливої кавітаційної підготовки ВПЕ для ДВЗ і для допалювання ВПЕ перед УК.

У більшості промислових котелень встановлено парові котли, що виробляють пар з тиском 1,3 МПа, а споживачі використовують його, як правило, при тиску 0,3...0,4 МПа. Цей перепад тиску пари в [32] пропонується корисно використовувати в КЕУ для виробництва електричної енергії з витратою пари з параметрами, необхідними основній масі споживачів ($p = 0,3...0,4$ МПа). Така установка може складатися з малогабаритного парового двигуна, парової турбіни (ПТ) або гвинтової розширювальної машини (ГРМ) і електричного генератора (Г) [32]. При малих витратах пари ГРМ мають більш високий ККД, ніж турбіни. При цьому має значення частота обертання ротора.

Модернізація об'єктів енергетики в даний час пов'язується з широким впровадженням високоефективних, екологічно чистих парогазових бінарних установок (ПГУ). Максимальна термодинамічна ефективність ПГУ визначається глибиною охолодження відхідних газів газотурбінної установки (ГТУ) в УК і максимально можливими параметрами пари, що виробляється в УК, що складається з двох парогенеруючих контурів (або навіть трьох) (високого - ВТ і низького - НТ тисків) з паровими барабанами і з багатократно примусовою циркуляцією (БПЦ) в контурах [16].

Послідовне нарощування параметрів і потужності парогазових блоків на зарубіжних електростанціях дозволило підвищити їх електричний ККД до 54...56 %, завдяки збільшенню ККД газотурбінної частини блоку, що має до того ж високу температуру відхідних газів (560...610 °С), а також внаслідок застосування в паросиловому циклі ПГУ високих параметрів пари, генерації в УК пари двох [69] і навіть трьох тисків [36].

Температура і витрата пари на виході з УК залежать від температури відхідних газів на вході і виході з ГТУ.

Один із способів збільшення потужності ПГУ - це впорскування водяної пари в камеру згоряння газової турбіни і спалювання додаткового палива в камері допалювання в газоході перед УК, що дає певні переваги.

Невеликі витрати палива, що додатково допалюється, дозволяють не ускладнювати конструкцію котла організацією спеціальної топки, а лише розмістити пальник в газоході перед УК. Допалювання палива перед УК збільшує генерацію пари в основному за рахунок підвищення кількості відхідної від ГТУ теплоти [12]. При цьому виникає можливість і необхідність визначення максимально можливої потужності паротурбінної установки (ПТУ).

В роботі [69] представлена зміна параметрів і показників ПГУ при використанні системи допалювання палива (СДП) для двох значень відносного значення палива, що допалюється, до витрати палива в ГТУ β_d і функціональні залежності від параметра β_d . У підсумку зі зростанням β_d збільшується термічний ККД ПГУ. Енергетично вигідний діапазон витрати цього палива, визначений умовою отримання приросту ККД ПГУ в порівнянні з бінарною схемою, становить 5...30 % витрати палива в ГТУ (за даними [146] потужність ПТУ може складати 40...50 % потужності сучасних ГТУ) і залежить від якості ГТУ (її ККД і температури відхідних газів). У зазначеному діапазоні приріст потужності ПТ при допалюванні складає 20...80 % її потужності в бінарній ПГУ. Автори [69] досліджували можливості підвищення потужності і ефективності ПГУ, створених на базі вітчизняних ГТУ, за рахунок СДП перед УК з метою забезпечення високих параметрів пари. ГТУ нового покоління, мають досить низьку температуру відхідних газів (385...465 °C). Тому в бінарних ПГУ температура перегрітої пари не вище 360...440 °C. При такій температурі і тиску свіжої пари 3...4 МПа ефективність паросилового циклу виявляється низькою. Проблема використання СДП фрагментарно розглядалася при дослідженнях бінарних ПГУ в [114, 81]. Методика розрахунків викладена в [84].

Збільшення витрати палива, що додатково допалюється, призводить до безперервного підвищення потужності ПТ як за рахунок безпосередньо енергії,

що підводиться з паливом, так і за рахунок більш ефективного використання енергії відхідних газів ГТУ внаслідок збільшення ККД парового циклу ($\eta_{\text{пц}}$) і ККД УК ($\eta_{\text{ук}}$).

В роботі [144] безрозмірна витрата палива в СДП в камері допалювання перед УК, оцінювалась за допомогою коефіцієнта ($\beta_d = B_d/B_{\text{ГТУ}}$, де B_d і $B_{\text{ГТУ}}$ - витрати палива в камері допалювання і в камері згорання ГТУ, відповідно. В [144] також представлені залежності, які характеризують вплив β_d на підвищення температури відхідних газів ϑ_r після камери допалювання (перед УК) за умови, що температура відпрацьованих в ГТУ газів дорівнює 400 °С, які показують, що основний вплив на величину ϑ_r має саме значення β_d . Вплив ККД ГТУ ($\eta_{\text{ГТУ}}$) на підвищення температури відхідних газів починає проявлятися в області $\beta_d > 0,07$.

Збільшення частки допалювання β_d дозволяє підвищити початкові параметри пари перед ПТ, що зумовлює підвищення потужності та ККД ПТУ. За даними [144] для $\beta_d = 0,25$, наприклад, електрична потужність зростає більш як на 100 % в порівнянні з потужністю без додаткового використання палива ($\beta_d = 0$). За результатами розрахунків горіння [145] найбільш доцільними режимами роботи ГТУ-ТЕЦ з СДП перед УК слід вважати режими, коли $\beta_d = 0,15 \dots 0,2$.

Одна з найбільш актуальних проблем теперішнього часу - проблема енергозбереження. Особливо гостро вона відчувається в автономних системах електропостачання з дизельними електростанціями (ДЕС), бо дуже велика ціна палива і вартість його постачання [52]. Зазвичай при проектуванні ДЕС її ДГ вибираються однотипними (для уніфікації обладнання) з умови забезпечення максимального навантаження електростанції [10].

В [63] розглянуті проблеми енергетичної оптимізації та управління автономними енергетичними комплексами малої енергетики, до складу яких входять різнотипні генеруючі установки і накопичувачі енергії, що забезпечує

високу маневреність КЕУ, необхідну в зв'язку зі значними добовими і сезонними коливаннями теплових та електричних потужностей споживачів.

Питання про доцільність оснащення ДЕС різнотипними агрегатами за умови мінімізації сумарної річної витрати палива ДЕС при відомому графіку навантаження з урахуванням його сезонної і добової зміни повинне вирішуватися на основі зіставлення досяжній при цьому економії палива і рівня експлуатаційних витрат [52]. Застосування різнотипних ДГ на ДЕС дозволяє економити від 0,6 до 3,4 % палива. Нестача теплової потужності від УК і при його відсутності повинна регулюватися роботою парового або водогрійного котлів (ВК). Більша гнучкість регулювання досягається при наявності утилізаційного турбогенератора (УТГ) у складі КЕУ.

У зв'язку з низькими значеннями температури відхідних газів за судновими СОД пропонується використання допалювання палива перед УК, що можливо у зв'язку із високим значенням α на рівні 2...3.

1.2 Екологічні показники роботи різних схем когенераційних установок

Виробництво енергії є одним з головних джерел забруднення навколишнього середовища. За оцінками екологів в даний час електростанції України відповідальні за 60...70 % сумарних національних викидів двоокису сірки SO_2 , 25 % викидів оксидів азоту NO_x і третини викидів двоокису вуглецю CO_2 - основного парникового газу. Використання первинного палива в когенераційних енергетичних технологіях [85, 13, 82, 83] в 2...3 рази ефективніше, ніж в традиційній енергетиці, що істотно знижує викиди забруднюючих речовин (NO_x , SO_2 та летючих органічних сполук). В [76] розглянуті економічно реальні шляхи виконання екологічних зобов'язань згідно із законодавством.

Низький рівень викидів шкідливих речовин з відпрацьованими газами автономних електростанцій з газовими турбінами є безперечною і вельми істотною перевагою установок цього типу, особливо за викидами найбільш

токсичних оксидів азоту NO_x . При роботі ГТУ, а також ПГУ, на газотурбінному паливі визначальними шкідливими інгредієнтами у відхідних газах є SO_x і NO_x , а при роботі на природному газі - NO_x . Сумарна екологіхімічна небезпека ГТУ при роботі на природному газі приблизно в 3...4 рази нижче, ніж при роботі на нафтовому газотурбінному паливі [80]. Розглянуті в [137] ГТУ в 1,1...2,7 рази перевищують встановлені нормативні (технологічні) вимоги до токсичності відхідних газів. Викиди NO_x газових турбін в 2,5...3 рази менше, ніж викиди поршневих двигунів.

Згідно найбільш жорстким вимогам національного стандарту Німеччини «TA-Luft», вміст NO_x і SO_x у відпрацьованих газах стаціонарних двигунів (в приведенні до $\text{O}_2 = 5\%$) не повинно перевищувати за $\text{NO}_x = 500 \text{ мг/м}^3$. У перерахунку до $\text{O}_2 = 15\%$ це значення відповідає концентрації $\text{NO}_x = 187,5 \text{ мг/м}^3$, що набагато більше норми для газових турбін, що дорівнює 50 мг/м^3 в перерахунку до $\text{O}_2 = 15\%$ [137].

Для порівняння показників роботи КЕУ при використанні мазутів і ВПЕ на їх основі представлені дані при використанні в КЕУ потужністю 1 МВт природного газу з нижчою теплотою згоряння 34219 кДж/м^3 [13], мазуту з теплотою згоряння 39200 кДж/кг і ВПЕ з тієї ж теплотою згоряння в ДВЗ [116] і котлах [9, 36].

Використання ВПЕ дозволяє істотно знизити викиди NO_x в 2,5...3 рази, SO_2 - в 1,8 рази [9, 36, 116]. Використання ВПЕ призводить до зниження температурного рівня факела, а, отже, і до сповільнення процесу утворення NO_x . Отримані в [116] дані свідчать про те, що застосування ПЕД в якості палива дозволяє істотно поліпшити екологічні показники двигуна (рис. 1.5, а,б). На режимах максимальної потужності концентрація у відпрацьованих газах NO_x знижується в 1,3...3,5 рази, концентрація CO знижується в 1,3...2 рази, димність - в 1,6...2,5 рази. На екологічні показники двигуна впливає не тільки вміст води в ПЕД, а й рівень її диспергації.

За даними [62] при використанні в якості ДГ автомобільного двигуна ЯМЗ-240 при великих значеннях потужності концентрація CO становила

600 ppm (0,296 кг/ГДж), NO_x - 2000 ppm (1,617 кг/ГДж) при електричному навантаженні близько 100 кВт (60 % номінальної) (рис. 1.6). При цьому збільшувалась питома витрата палива. Концентрація NO_x перевищує гранично допустиме значення на 30...50 %, що пов'язано з особливостями процесу горіння природного газу в газовому двигуні, і для її зниження потрібні спеціальні заходи очищення.

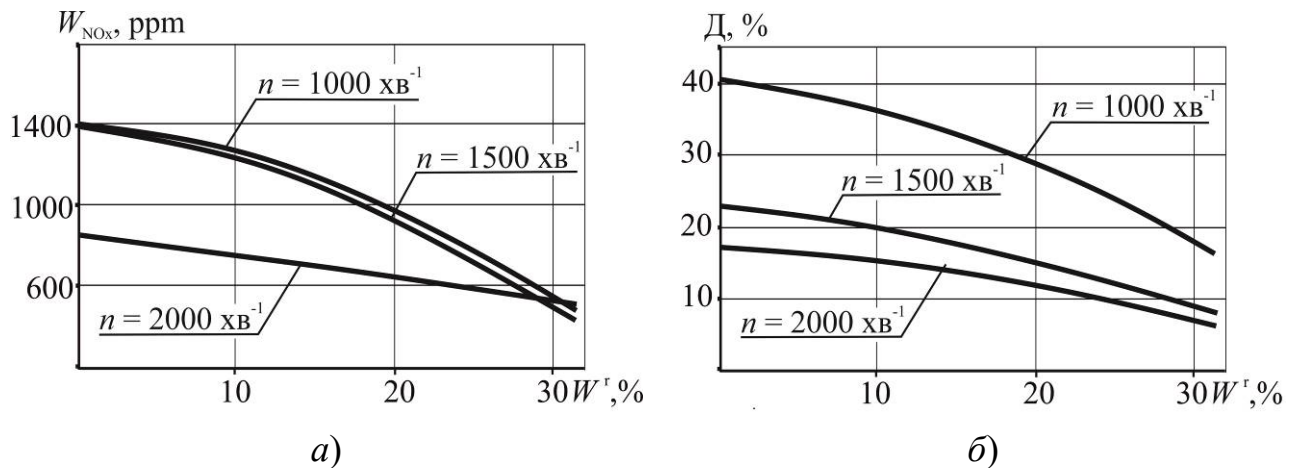


Рис. 1.5. Залежності концентрації оксидів азоту (а) та димності (б) у відпрацьованих газах від вмісту води в ПЕД

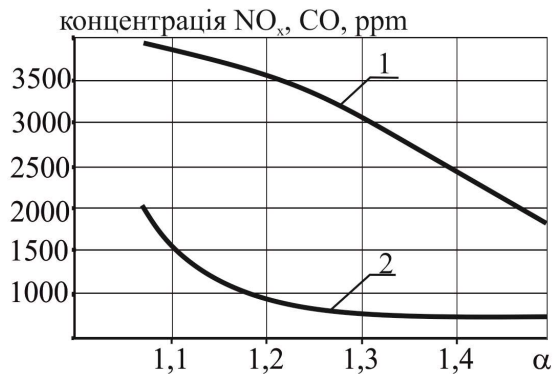


Рис. 1.6. Залежності концентрацій NO_x (1) і CO (2) від коефіцієнта надлишку повітря α

Відомі способи очищення відхідних газів від токсичних сірчистих сполук при використанні мазутів в ДВЗ [1, 2, 3]. На думку спеціалістів фірми MAN [5] вимоги IMO (III рівень з емісії SO_x , NO_x) можливо виконати за допомогою технологій:

- використання ВПЕ – WIF (Water in Fuel emulsion);
- зволоження наддувного повітря – SAM (Scavenge Air Monistening);
- рециркуляція відхідних газів – EGR (Exhaust Gas Recirculation);

- селективне каталітичне зниження емісії NO_x – SCR (Selective Catalytic Reduction).

До радикальних і достатньо простих способів зниження сірчистих сполук належить очищення відхідних газів за допомогою скрубєрних технологій, де SO_x , NO_x , CO_2 та зважені частки з газового потоку поглинаються водою. В гібридній системі очищення Alfa Laval і Aalborg Industries [4] першою стадією очищення вважається УК, що може розглядатися як і етап очищення від твердих часток. На другій стадії очищення за рахунок використання скрубєра Вентурі при впорскуванні води продовжується зниження температури відхідних газів і ступінь очищення від твердих часток за рахунок їх зволоження.

В системі очищення селективного каталітичного відновлення (СКВ або SCR) [23, 34] здійснюється тільки очищення від NO_x за допомогою дорогих каталізаторів і введення в якості відновлювача розчину сечовини і аміаку.

Оскільки тільки вищі оксиди азоту краще поглинаються водою з утворенням азотної і азотистої кислот, то абсорбцію оксидів азоту NO_x водою необхідно проводити при попередньому доокисненні NO до NO_2 і N_2O_3 . Авторами [72, 73] прийняте рішення про швидке окиснення NO у NO_2 з використанням в якості окисника озону.

У системі очищення [2] розглядається система очищення відхідних газів CSNO_x , що розроблена компанією «Ecospec Global Technology», яка на відміну від раніше розглянутих технологій дозволяє більш інтенсивно знижувати вміст трьох токсичних інгредієнтів - SO_x , CO_2 і NO_x .

Використання схеми CSNO_x для очищення відхідних газів після ДВЗ марки 6S50MC, в якому використовувалось паливо – з $S^r=3,64\%$, показало, що при вмісті токсичних речовин на виході з ДВЗ 846,05 ppm SO_2 , 709,26 ppm NO_x і 3,99 % CO_2 , на виході зі скрубєра вміст тих же інгредієнтів склав 10,75 ppm SO_2 , 243,11 ppm NO_x і 0,93 % CO_2 . Емісія шкідливих речовин знизилася у такому співвідношенні: SO_2 – 98,7 %, NO_x – 65,7 %, CO_2 – 76,7 % [2].

1.3 Вплив токсичних компонентів і твердих часток в газах на інтенсивність корозії і забруднення поверхонь нагріву утилізаційних котлів

Кількість часток (відкладень), що осіли і закріпилися на НТПН, залежить від багатьох факторів (розміри і форма часток, аеродинамічні умови, адгезійні властивості плівки кислоти на поверхні осадження), але можна стверджувати, що кількість відкладень цих часток пропорційно їх концентрації в газах.

Забруднення на НТПН складаються з продуктів корозії і відкладень твердих часток. За численними опублікованими даними, наприклад, у високообертових двигунах (ВОД) (рис. 1.7) [65, 64] зі збільшенням α до $\sim 1,5 \dots 2,0$ концентрація твердих часток різко знижується (в 2...3 рази).

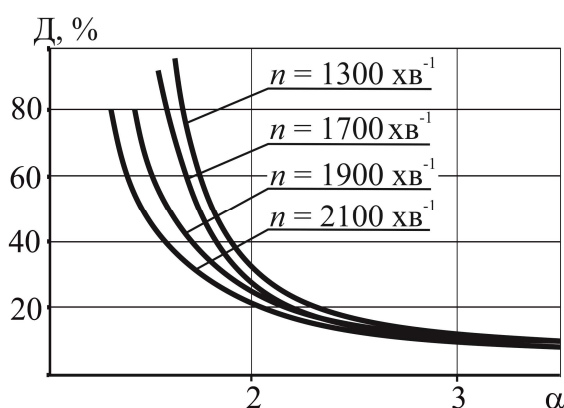


Рис. 1.7. Дослідні характеристики димності відпрацьованих газів дизеля ЯМЗ-236

Опублікована невелика кількість робіт, присвячених утворенню твердих часток у відхідних газах при використанні ВПЕ. Згідно з даними [107, 74] зі збільшенням вмісту води в ВПЕ спостерігається зниження концентрації твердих часток C_T в потоці відхідних газів. Особливо різке зниження C_T спостерігається при збільшенні вмісту води в ВПЕ W^r до 10 % [107], причому значення C_T залежить від теплової потужності установки. Загальна концентрація твердих часток знижується (рис. 1.8) через зменшення вмісту коксу, оскільки кількість золи і H_2SO_4 залишилося колишнім (рис. 1.9) [107].

За даними [141] (рис. 1.10) збільшення вмісту води в ВПЕ призводить до зниження димності, як показника вмісту твердих зольних і сажових часток в потоці відхідних газів.

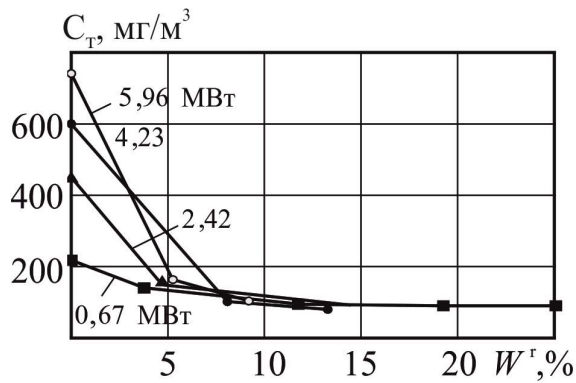


Рис. 1.8. Залежності концентрації твердих залишків згорання палива C_T від присадки води до мазуту при навантаженнях 0,67...5,96 МВт

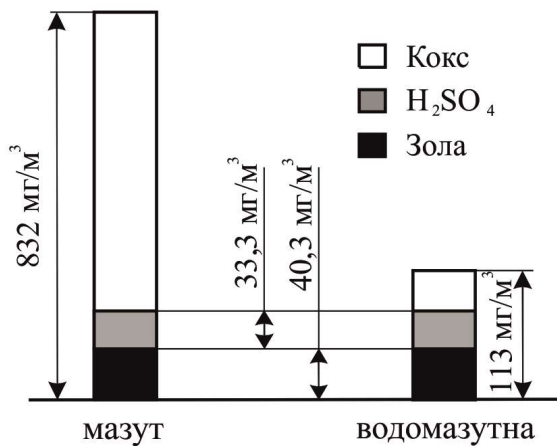


Рис. 1.9. Діаграма вмісту твердих часток в продуктах згорання при використанні мазуту і ВПЕ

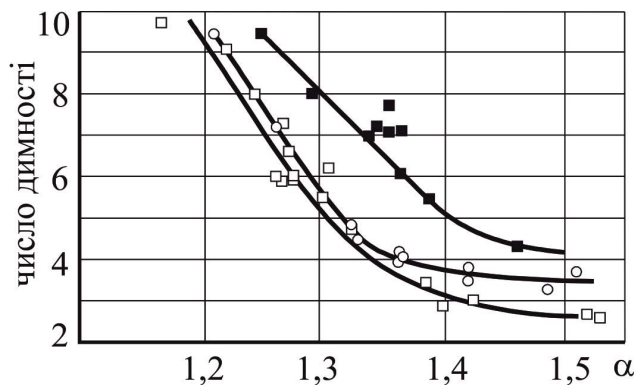


Рис. 1.10. Залежність викиду диму від коефіцієнта надлишку повітря [141]: процентний вміст води в емульсії: ○ - 2 %; ■ - 20 %; □ - 30 %

Практично такі ж залежності представлені в [148] (рис. 1.11), де наведені дані про концентрацію сажових часток C_s , що отримані при використанні ВПЕ з різною паливною основою.

За даними [116, 148] величина СЧ залежить також від дисперсності емульсії. Крива зміни концентрації СЧ має яскраво виражений мінімум в діапазоні розмірів дисперсної фази емульсії 35...45 мкм (рис. 1.12) [148], що пояснюється більш високою якістю горіння внаслідок мікрровибухів крапель ВПЕ.

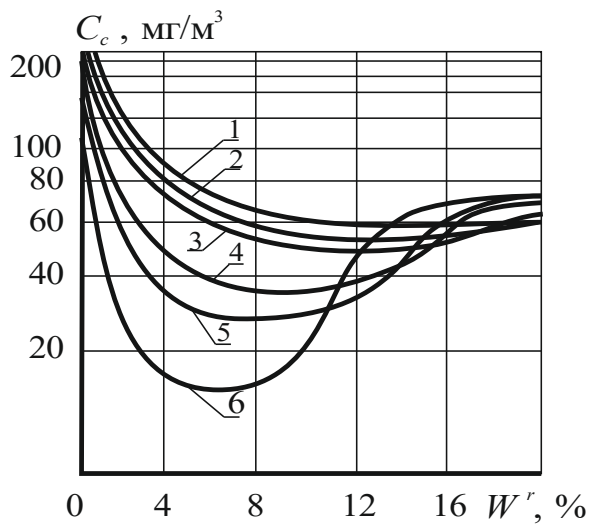


Рис. 1.11. Залежність концентрації сажових часток від вологості ВПЕ з паливною основою:

1 - мазут М100; 2 - суміш М100 (70 %) і ДП (30 %); 3 - суміш М100 (60 %) і ДП (40 %); 4 - моторне паливо ДП; 5 - суміш ДП (60 %) і пічного палива (40 %); 6 - пічне паливо

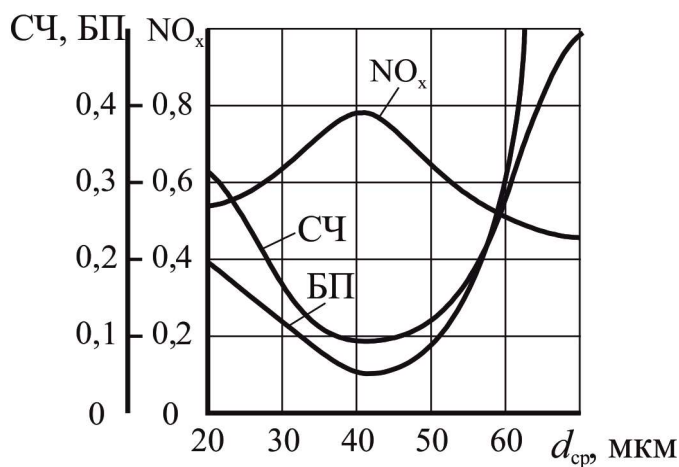


Рис. 1.12. Залежності концентрацій сажових часток ($CЧ$), бензапірена ($БП$) і NO_x від розмірів дисперсної фази ВПЕ (значення усереднених концентрацій, прийнятих за 100 %, mg/m^3):

$CЧ$ – 385; NO_x – 250; $БП$ – $14 \cdot 10^{-5}$

Дослідженнями фракційного складу $CЧ$ в продуктах згоряння ВПЕ [97, 96, 148] було встановлено, що дисперсність $CЧ$ не залежить від розмірів дисперсної фази ВПЕ, але спостерігається значна різниця в розмірах агрегатів цих часток.

Кількість твердих часток, які осідають на НТПН, залежить від кінетичної енергії часток на підльоті до поверхні і енергії її адгезії з поверхнею. Величина кінетичної енергії частки визначається аеродинамічними характеристиками потоку і масою частки, а адгезії - станом поверхні, яка збільшується при наявності на поверхні липкого шару кислоти, а також кислоти на поверхні часток [30, 29, 28, 38]. Аналіз сил, що діють на частки, які рухаються в потоці газів поблизу поверхонь нагріву УК, показав, що на частки діють сили термофорезу і тяжіння, аеродинамічного опору, сили турбулентних пульсацій [97]. Дисперсний склад часток в продуктах згоряння характеризується широким

спектром розмірів часток: $10^{-9} < r < 10^{-4}$ м. При цьому найбільшу за масою кількість часток має медіанний розмір $(2,5...7,5) \cdot 10^{-6}$ м. У [97] встановлено зв'язок між інтенсивністю утворення відкладень і кількістю розчину H_2SO_4 , що конденсується на поверхні нагріву, але при використанні рідких палив.

1.4 Особливості процесів низькотемпературної корозії і забруднення поверхонь нагріву

При горінні сірчистих палив спочатку утворюється SO_2 , а потім в залежності від умов має місце доокиснення SO_2 в SO_3 надлишковим киснем. Причому, залежність конверсії SO_2 в SO_3 від надлишку повітря має такий же вигляд, як і залежності швидкості НТК від α (рис. 1.13) [33]. За численними даними істотне зростання вмісту SO_3 спостерігається при збільшенні α до $\sim 1,5$, а потім зростання концентрації SO_3 припиняється (вміст SO_3 практично не змінюється при збільшенні α вище 1,5).

В зв'язку з тим, що парціальний тиск пари p_{H_2O} у відхідних з ДВЗ газах складає $\sim 10...15$ кПа, а парціальний тиск SO_3 ($p_{SO_3} = 2,5...8$ Па), то у відхідних газах при температурі ~ 300 °С утворюється пара H_2SO_4 з парціальним тиском $p_{H_2SO_4} = 2...5$ Па, що визначає температуру точки роси пари H_2SO_4 $t_{pH_2SO_4}$ на рівні $130...150$ °С. Температура точки роси $t_{pH_2SO_4}$ залежить від вмісту сірки в рідкому паливі (рис. 1.13, б).

Значення швидкості НТК, що отримані в результаті досліджень при використанні мазутів з $W^r \approx 2\%$ із різним вмістом сірки S^r і коефіцієнтах надлишку повітря α до 1,5, представлені в численних літературних джерелах і узагальнені в [30, 22]. Ці значення отримані при різній тривалості впливу потоку відхідних газів: від 2-х до 100 год [22, 30, 109] і до 1000 год [22, 30, 109]. Причому, в основному дослідження НТК проводилися на діючих котлах, при експлуатації яких неможливо забезпечити сталість параметрів і, отже, стабільність складу та корозійних властивостей відпрацьованих газів і їх

температури навіть протягом декількох годин. Опублікована велика кількість даних з розвитку процесів корозії і забруднення поверхонь нагріву при використанні сірчистих палив в промислових (допоміжних судових котлах) і енергетичних котлах [22, 109]. Практично немає даних з інтенсивності цих процесів в УК, що встановлюються після ДВЗ.

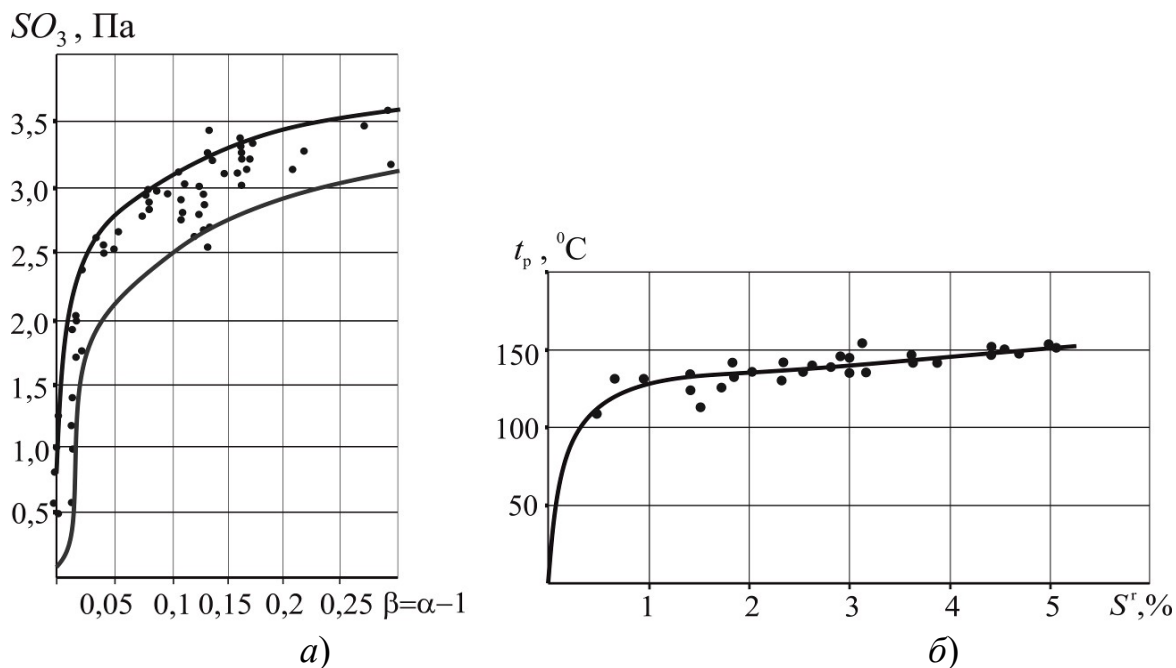


Рис. 1.13. Вплив коефіцієнта надлишку повітря α і вмісту сірки S^r на механізм НТК: а) на концентрацію SO_3 ; б) на температуру точки роси $t_{p\ H_2SO_4}$

В літературі відсутні конкретні дані зі швидкості корозійних процесів при використанні ВПЕ: є тільки непрямі свідчення зниження інтенсивності процесів забруднення і корозії за такими якісними показниками, як зміна характеру корозії (виразкова корозія перейшла в рівномірну), збільшення періоду між очищеннями і ремонтами поверхонь нагріву котлів [152]. Авторами [152] представлені результати експлуатаційних випробувань котла КВГ-34К при використанні товарного палива М100В і ВПЕ на його основі з водовмістом 30 % при $\alpha = 1,3 \dots 1,4$. При використанні ВПЕ спостерігалось зниження швидкості відкладень і зміна їх структури на поверхнях нагріву котла. Змінився характер корозії, спостерігалась відсутність виразкової і наявність тільки рівномірної поверхневої корозії. Але в [152] відсутні кількісні дані з

інтенсивності цих процесів залежно від α , W^r і тим більше $t_{ст}$, так як для цього необхідно проведення спеціальних експериментальних досліджень.

В [125] представлені експериментальні залежності швидкості корозії від температури стінки поверхні нагріву. Тривалість випробувань становила 6 годин. Швидкість корозії знаходилась на рівні $0,25 \dots 5 \text{ г}/(\text{м}^2 \cdot \text{год})$ при коефіцієнтах надлишку повітря α в межах $1,04 \dots 1,14$ при $t_{ст}$ на рівні 120°C .

В [127] представлені результати експериментальних досліджень інтенсивності корозії і забруднення поверхонь нагріву УК марки КУП-1300, встановленого після ГТД М-25, при використанні палива ДС із вмістом сірки $S^r = 0,1\%$ при надлишках повітря α на рівні 6,5 і 8,4 (при частковій потужності ГТД) при $t_{ст}$ нижче температури точки роси H_2SO_4 . Температура точки роси становила 115°C . Тривалість корозійних випробувань становила $15 \dots 19$ год, швидкість НТК перебувала в області «кислотного піка» в межах $0,24 \dots 0,32 \text{ г}/(\text{м}^2 \cdot \text{год})$, а швидкість утворення відкладень - $0,27 \dots 0,74 \text{ г}/(\text{м}^2 \cdot \text{год})$ (рис. 1.14).

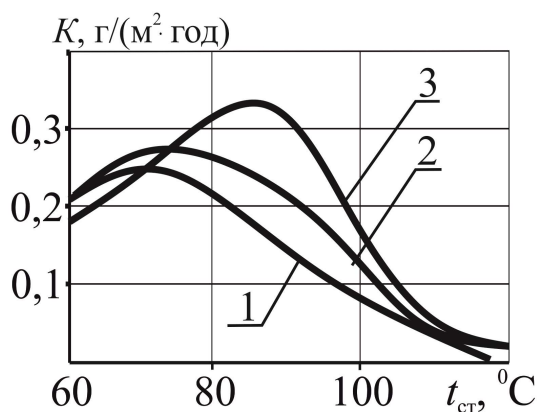


Рис. 1.14. Швидкість корозії в залежності від температури стінки:

1 – II режим; 2 – I режим; 3 – III режим

В [120] опубліковані дані зі швидкості НТК і зростання відкладень, що отримані при проведенні досліджень на допоміжному котлі при α , що відповідають надлишку повітря в ДВЗ ($2,3 \dots 2,5$) при використанні мазуту з вмістом сірки на рівні $1,6 \dots 1,7\%$. Тривалість випробувань становила 6,5 години, втрата маси металу зразків внаслідок корозії становила $3,75 \text{ г}/\text{м}^2$, а маса відкладень коксо-сажових часток – $25 \text{ г}/\text{м}^2$ в районі кислотного піка при $t_{ст} = 110^\circ\text{C}$ (рис. 1.15).

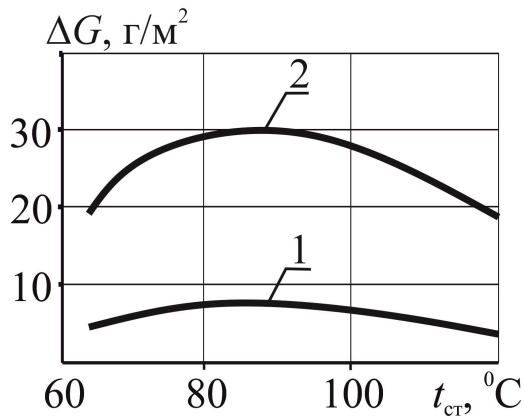


Рис. 1.15. Результати експериментальних досліджень НТК і заносів відкладень:

1 – втрата маси зразка; 2 – маса відкладень коксо-сажових часток

В [128] представлені експериментальні дані корозії і відкладень при використанні мазуту Ф-5 у котлі КВВ-5/28 при надлишку повітря $\alpha = 1,8$, з вмістом сірки $S^r = 1,25\%$ і тривалості випробувань 500 годин. Швидкість корозії становила $0,1 \dots 0,03 \text{ г/(м}^2 \cdot \text{год)}$, а кількість відкладень - $100 \dots 300 \text{ г/м}^2$ в діапазоні часу експерименту 100...500 годин при температурах стінки $90 \dots 95^\circ\text{C}$.

В [106] середня швидкість корозії оребрених труб економайзера зі сталі Ст10 за час випробувань 14500 год при температурі стінки труби $40 \dots 60^\circ\text{C}$ складала $1,45 \cdot 10^{-5} \text{ мм/рік}$. При температурі стінки вище 95°C НТК практично відсутня. При проведенні досліджень використовувалось газотурбінне паливо і газойль, які містять сірку в межах $0,5 \dots 0,8\%$.

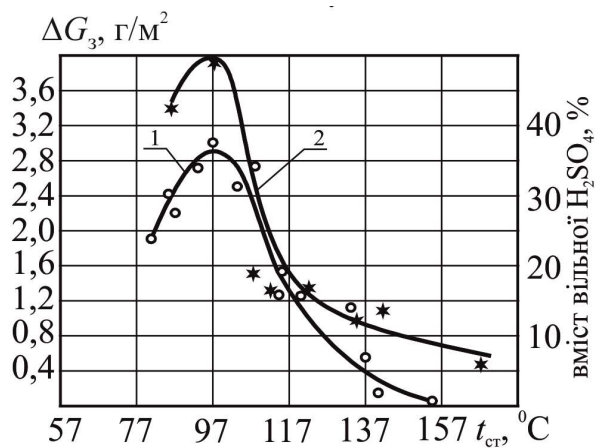


Рис. 1.16. Залежність кількості забруднень (1) і вмісту в них вільної сірчаної кислоти (2) від температури стінки; паливо сірчастий мазут; тривалість експерименту $\tau = 824$ годин (шаховий пучок труб)

В [110] представлені результати досліджень процесу утворення низькотемпературних відкладень і корозії на паровому котлі ПК-41 при використанні в ньому мазуту з $S^r = 2,5 \dots 3,3\%$ і зольністю $0,1\%$. Термін дослідів становив 6 годин. Втрата маси металу зразків внаслідок корозії складала 10 г/м^2 , а маса відкладень – 100 г/м^2 при $t_{ст} = 100^\circ\text{C}$. В опублікованих

роботах з експлуатації ДВЗ на ВПЕ [110] не розглядались питання інтенсивності корозійних процесів в УК, які можуть бути встановлені після ДВЗ, що працюють на ВПЕ. Інтенсивне зростання золотого занесення починалось при температурі стінки близько 135°C і досягало першого максимуму в районі температур стінки $100...105^{\circ}\text{C}$ (рис. 1.17). При подальшому зниженні температури поверхні, приблизно до 80°C , відзначалось зменшення кількості забруднень. Зростання забруднення знову починалось при температурі стінки 80°C . В області температур стінки, близьких до температури точки роси водяної пари, забруднення посилюється в десятки разів (при температурах стінки нижче 70°C) внаслідок зростання масопотоків пари H_2O .

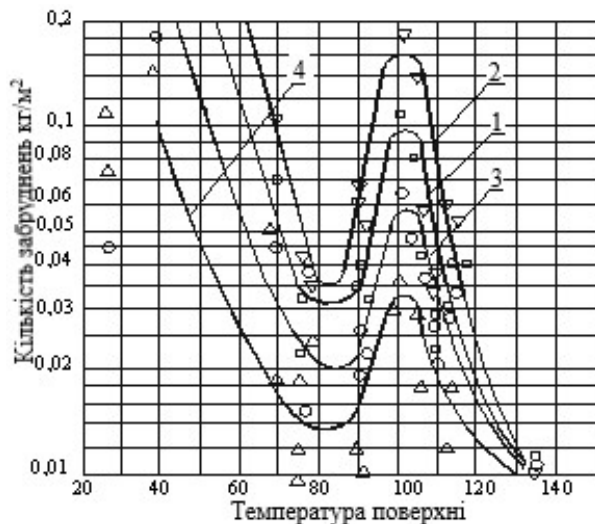


Рис. 1.17. Кількість забруднень в залежності від температури поверхні при тривалості впливу потоку газів 6 годин [110]:

1 - усереднена величина; 2 - лобова частина; 3 - кормова частина; 4 - бічні частини

В [35] представлені результати досліджень процесу корозії, що отримані на експериментальній установці, при використанні ВПЕ на основі мазуту М40 ($S^r = 1,8\%$, $W^r = 30\%$) при коефіцієнті надлишку повітря $\alpha = 1,45$ і для порівняння при використанні того ж мазуту при водовмісті $W^r = 2,0\%$ і α , рівному 1,05, що відповідає режиму спалювання палива в допоміжному котлі. Тривалість дослідів становила від 2 до 100 годин. Представлені на рис. 1.18 кількісні залежності швидкості корозії K в області кислотного піка при $t_{\text{ст}} = 110^{\circ}\text{C}$ показують, що рівень корозії при використанні мазуту з $W^r = 2\%$ знаходиться на рівні $K = 0,63 \text{ г}/(\text{м}^2 \cdot \text{год})$ навіть при $\alpha = 1,05$, тоді як при використанні ВПЕ швидкість корозії складає $K = 0,17 \text{ г}/(\text{м}^2 \cdot \text{год})$ при $\alpha = 1,45$.

Представлені в [35] залежності показують, що при використанні ВПЕ в котлах при їх водовмістості близько 30 % призводить до зниження швидкості НТК до рівня 0,15 мм/рік (при $\tau = 1000$ годин), що дає можливість знизити температуру стінки в останніх рядах труб котла до 70...80 °С і значно збільшити глибину утилізації теплоти газів. Зниження швидкості НТК при збільшенні водовмісту пояснюється пасивацією поверхні металу оксидами азоту [8].

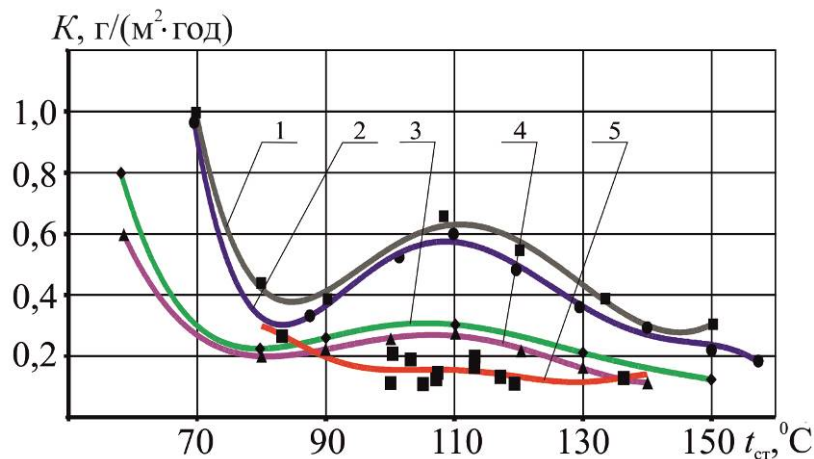


Рис. 1.18. Залежність швидкості корозії від температури стінки при використанні:

- 1 - М100 ($S^r = 2,0 \%$; $W^r = 2,0 \%$) $\alpha = 1,05$, $\tau = 100$ год;
- 2 - М100 ($S^r = 2,0 \%$; $W^r = 2,0 \%$) $\alpha = 1,025$, $\tau = 100$ год;
- 3 - М100 ($S^r = 2,0 \%$; $W^r = 2,0 \%$) $\alpha = 1,01$, $\tau = 100$ год);
- 4 - М 40 ($S^r = 0,96 \%$; $W^r = 2,0 \%$) $\alpha = 1,01$, $\tau = 100$ год;
- 5 - ВПЕ М40 ($S^r = 1,8 \%$; $W^r = 30,0 \%$) $\alpha = 1,45$, $\tau = 88$ год.

У складі забруднень на металевих трубах спостерігається великий вміст з'єднань заліза (до 38 %) [48, 109], а при температурах стінки нижче температури точки роси і залишкової сірчаної кислоти продукти корозії металу міцно пов'язані з поверхнею. В основному внаслідок корозії відбувається збільшення товщини шару, що впливає на інтенсивність теплопередачі і величину аеродинамічного опору.

В процесі роботи котлоагрегату температура зовнішньої поверхні забруднень з часом постійно підвищується через зростання їх товщини [24]. На рис. 1.19 показано зміну під час експлуатації основних показників роботи коридорних пучків труб внаслідок забруднень при використанні рідкого палива: аеродинамічний опір збільшується, коефіцієнт теплової ефективності ξ падає, а тепловий опір ε_3 пучків з коридорним розташуванням труб зростає. Значення теплової ефективності і аеродинамічного опору в залежності від часу визначають необхідність і періодичність проведення очищень.

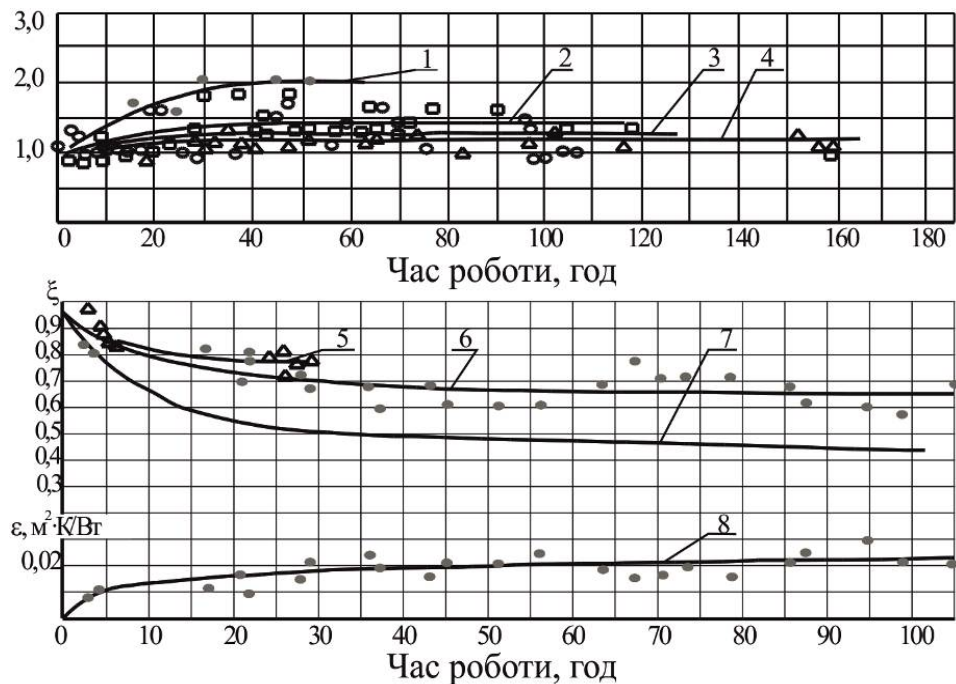


Рис. 1.19. Зміна в часі відносного аеродинамічного опору (а), коефіцієнтів теплової ефективності і теплового опору відкладень (б) підігрівачів повітря з коридорним розташуванням труб: 1, 2, 3, 5, 7 - різні котли; 4, 6, 8 - котли з присадкою MgCl_2 0,6...0,8 кг/т палива

За даними [119] в міру наростання відкладень на НТПН з $t_{\text{ст}}$ нижче температури точки роси пари H_2SO_4 через приблизно 85 годин товщина шару досягає 4 мм і стабілізується, так як на поверхні шару відкладень температура стає рівною і вище температури точки роси H_2SO_4 .

В [134] дані кількісні залежності інтенсивності забруднення K_3 при

використанні мазуту М40 і ВПЕ на його основі при α в діапазоні 1,25...1,35 ($\tau = 8$ годин). Аналіз даних (рис. 1.20) показує, що при використанні мазуту з $W^r = 2\%$ швидкість забруднення складає $K_3 = 30 \text{ г/(м}^2 \cdot \text{год)}$, при використанні ВПЕ швидкість забруднення знаходиться на рівні $K_3 = 25 \text{ г/(м}^2 \cdot \text{год)}$.

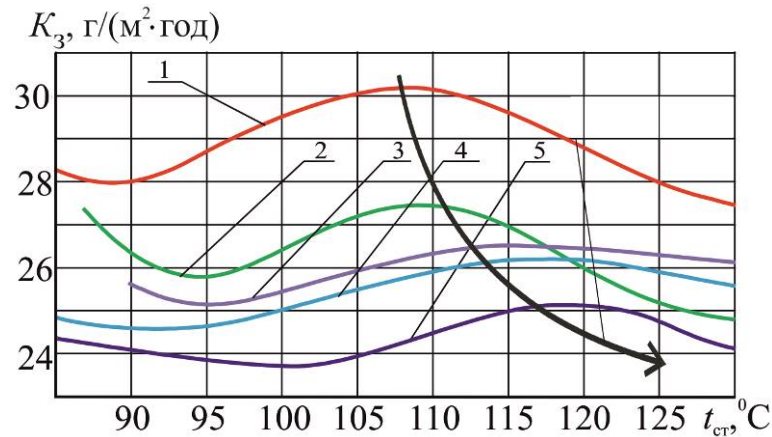


Рис. 1.20. Залежність швидкості (інтенсивності) забруднення поверхні нагріву при використанні мазуту марки М40 і ВПЕ на його основі від температури стінки $t_{ст}$ ($\tau = 8$ годин):

1 - ($W^r = 2\%$, $S^r = 1,8\%$, $\alpha = 1,35$); 2 - ($W^r = 10\%$, $S^r = 1,8\%$, $\alpha = 1,35$);
 3 - ($W^r = 15\%$, $S^r = 1,8\%$, $\alpha = 1,5$); 4 - ($W^r = 17\%$, $S^r = 1,7\%$, $\alpha = 1,25$); 5 -
 ($W^r = 30\%$, $S^r = 1,5\%$, $\alpha = 1,25$).

За даними [77] при використанні ВПЕ відкладення стають пухкими, легко видаляються водою або взагалі відсутні внаслідок зменшення утворення сажі і коксу, так як при горінні крапель ВПЕ спостерігаються мікрровибухи крапель, які інтенсифікують процес горіння, що спостерігається і в камерах згоряння ДВЗ [117]. Але і в цих літературних джерелах немає кількісних даних з інтенсивності НТК і забруднення НТПН.

Відповідно до представленого в [8, 119] механізму утворення відкладень велике значення має розмір часток: частки з радіусом менше $1,2 \cdot 10^{-5}$ м при своєму русі слідують лініям току газів (і тому практично не осідають), а більші частки як би «пробивають прикордонний шар і осідають». При використанні ВПЕ завдяки мікрровибухам крапель ВПЕ розміри часток в основному меншого

розміру і знаходяться на рівні $1,2 \cdot 10^{-6}$ м, тому забруднення НТПН різко знижується.

1.5 Обґрунтування напряму, постановка мети і завдань дослідження

Мета наукового дослідження - підвищення техніко-економічної ефективності роботи утилізаційних котлів і теплоутилізаційних контурів когенераційних установок за рахунок інтенсифікації теплообміну та зменшення швидкості процесів низькотемпературної корозії і забруднення поверхонь нагріву, зниження емісії шкідливих речовин в атмосферу при використанні водопаливних емульсій.

Основні задачі наукового дослідження:

- експериментальні дослідження процесів корозії і забруднення низькотемпературних поверхонь нагріву утилізаційних котлів при коефіцієнтах надлишку повітря $\alpha = 1,5 \dots 3,0$, що визначають інтенсивність теплообміну, глибину утилізації теплоти відхідних газів і надійність експлуатації теплоутилізаційних контурів когенераційних установок;
- дослідження впливу коефіцієнта надлишку повітря α , водовмісту емульсії W^r і вмісту сірки в паливі S^r на інтенсивність низькотемпературної корозії і забруднення;
- теоретичне обґрунтування прогнозування низькотемпературної корозії і забруднення на основі статистичних даних і результатів експериментальних досліджень при коефіцієнтах надлишку повітря $\alpha = 1,5 \dots 3,0$;
- визначення мінімального значення температури стінки $t_{ст}^{min}$, при якому забезпечується допустима швидкість низькотемпературної корозії на рівні 0,25 мм/рік і мінімальне значення температури відхідних газів $\vartheta_{вих}^r$ $\vartheta_{вих}^r$ на виході з утилізаційного котла;
- визначення необхідної періодичності очищення поверхонь нагріву

утилізаційних котлів;

- визначення екологічних і економічних показників розроблених теплоутилізаційних контурів когенераційних установок.

Висновки по розділу 1

1. Відсутні кількісні дані зі швидкості корозії і забруднення НТПН при осадженні з потоку димових газів твердих часток золи і коксу на поверхнях нагріву котлів при використанні ВПЕ з надлишком повітря α вище 1,5 (до 3,0).

2. При використанні судових ДВЗ в КЕУ теоретично вся енергія теплових втрат, за виключенням радіаційних і конвективних втрат теплоти власне від двигуна, може бути корисно використана, що і забезпечує високу ефективність використання палива.

3. Використання допалювання ВПЕ надає можливість одночасного вирішення ряду завдань – підвищення економічності ДВЗ, зменшення нагароутворення, димності і токсичності відпрацьованих газів.

4. Так як коефіцієнти надлишку повітря і температури відпрацьованих газів сучасних ГТУ і судових ДВЗ близькі, то можливо створення пародизельних установок у складі КЕУ. Тому коректне використання досягнень, що отримані в сучасних ПГУ.

5. У зв'язку з низькими значеннями температури відпрацьованих газів за судовими СОД пропонується використання допалювання палива перед УК, що можливо у зв'язку із високим значенням α на рівні 2...3.

6. Використання первинного палива в когенераційних енергетичних технологіях в 2...3 рази ефективніше, ніж в традиційній енергетиці, що істотно знижують викиди забруднюючих речовин (оксидів азоту, двоокису сірки та летких органічних сполук).

7. Використання ВПЕ дозволяє істотно знизити викиди NO_x в 2,5...3 рази, SO_2 - в 1,8 рази.

8. При певних співвідношеннях коефіцієнта надлишку повітря α і

водовмісту палива W^r , що спалюється, забезпечується ефективна робота не тільки без зниження ККД, але і зі збільшенням економічності. При цьому оптимальна кількість води в ВПЕ, з точки зору можливості досягнення зростання ККД ДВЗ, становить близько 20...25 %, а з точки зору мінімальної НТК і забруднення при $W^r = 30$ %.

РОЗДІЛ 2

ОБГРУНТУВАННЯ ТА РОЗРОБКА МЕТОДОЛОГІЧНОЇ БАЗИ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ УТИЛІЗАЦІЇ ТЕПЛОТИ В КОГЕНЕРАЦІЙНИХ УСТАНОВКАХ ПРИ ВИКОРИСТАННІ ВОДОПАЛИВНИХ ЕМУЛЬСІЙ

2.1 Методика проведення експериментальних і аналітичних досліджень

Теплова і електрична потужність КЕУ залежить від значень температур відхідних газів на вході і виході з УК у складі КЕУ. Глибока утилізація теплоти відхідних газів в УК визначається мінімально допустимим значенням температури відхідних газів за УК, яка обмежується швидкістю НТК в останньому ряді труб НТПН. Високу температуру газів перед УК можливо забезпечити тільки додатковим допалюванням палива перед УК.

При створенні моделі розвитку процесів НТК і забруднення НТПН (НТЗ) для визначення періодичності очищення поверхонь нагріву, пов'язаної зі збільшенням аеродинамічного опору тракту і зниженням інтенсивності теплопередачі, що приводить до зменшення теплової потужності УК (його паропродуктивності), а значить до зниження значень теплової і електричної потужності КЕУ, необхідно знати кінетику розвитку процесів корозії і забруднення НТПН УК. Максимально достовірні закономірності їх розвитку можливо отримати тільки на основі експериментальних досліджень тривалістю до 1000 годин, які доцільніше проводити на експериментальній установці, де легше забезпечити сталість всіх параметрів (процесу горіння, температур газів і поверхні зразків труб, швидкості газів). Проведення досліджень корозійних процесів тривалістю близько 1000 годин на експериментальній установці викликає великі труднощі. Тому необхідно дослідити кінетику розвитку НТК, щоб оцінити швидкість корозії і забруднення, час стабілізації процесу,

отримати рівняння, що дозволить прогнозувати розвиток корозії і забруднення на будь-який час дії потоку газів. Отримані результати дозволять здійснити порівняння з опублікованими даними, які часто отримані при різній тривалості дослідів [22, 30, 28, 109, 110].

2.1.1 Методика експериментальних досліджень

Опубліковано мало даних з інтенсивності НТК і НТЗ в УК при використанні мазуту при $\alpha = 2,5 \dots 3$. Основний масив даних одержано при $\alpha = 1,1 \dots 1,5$ при вмісті сірки в паливі $0,5 \dots 2 \%$. Тому при плануванні проведення короточасних експериментальних досліджень необхідно врахувати механізм впливу α і S^r на інтенсивність корозійних процесів в розглянутому діапазоні їх зміни. Інтенсивність корозійних процесів визначається впливом α і S^r на утворення SO_3 і кількість пари H_2SO_4 , при конденсації яких починається розвиток НТК і осадження твердих часток. В межах зростання α від 1,01 до 1,1 спостерігається стрімке зростання вмісту SO_3 (рис. 2.1, а), а значить і зростання кількості пари H_2SO_4 . Потім при більш високих α має місце стабілізація вмісту SO_3 . У межах зміни вмісту сірки від 0 до 1 % має місце стрімке зростання температури точки роси t_p (рис. 2.1, б), значення якої також характеризує вміст пари H_2SO_4 у відхідних газах і підпорядковується степеневій залежності. При S^r більше 1 % відбувається стабілізація значення температури t_p [109].

Обробка даних, представлених на рис. 2.1, вказує на те, що розвиток корозійних процесів в залежності від α і S^r достовірно описуються степеневими залежностями, які і були використані при обробці даних досліджень корозійних процесів. Отже, вид залежності і рівень розвитку інтенсивності НТК і забруднення НТПН УК можливо визначити за даними на початковій ділянці досліджуваних залежностей від α і S^r . Тому слід вважати коректним отримання апроксимаційних рівнянь $\Delta G_k = f(\alpha)$ і $\Delta G_z = f(\alpha)$ за даними досліджень на експериментальній установці при значеннях α від 1,05 до 1,5, а потім оцінити

коректність цих рівнянь до процесів в УК за значеннями ΔG_k і ΔG_3 при $\alpha = 2,9$, отриманим при проведенні експериментів на реальному УК на судні.

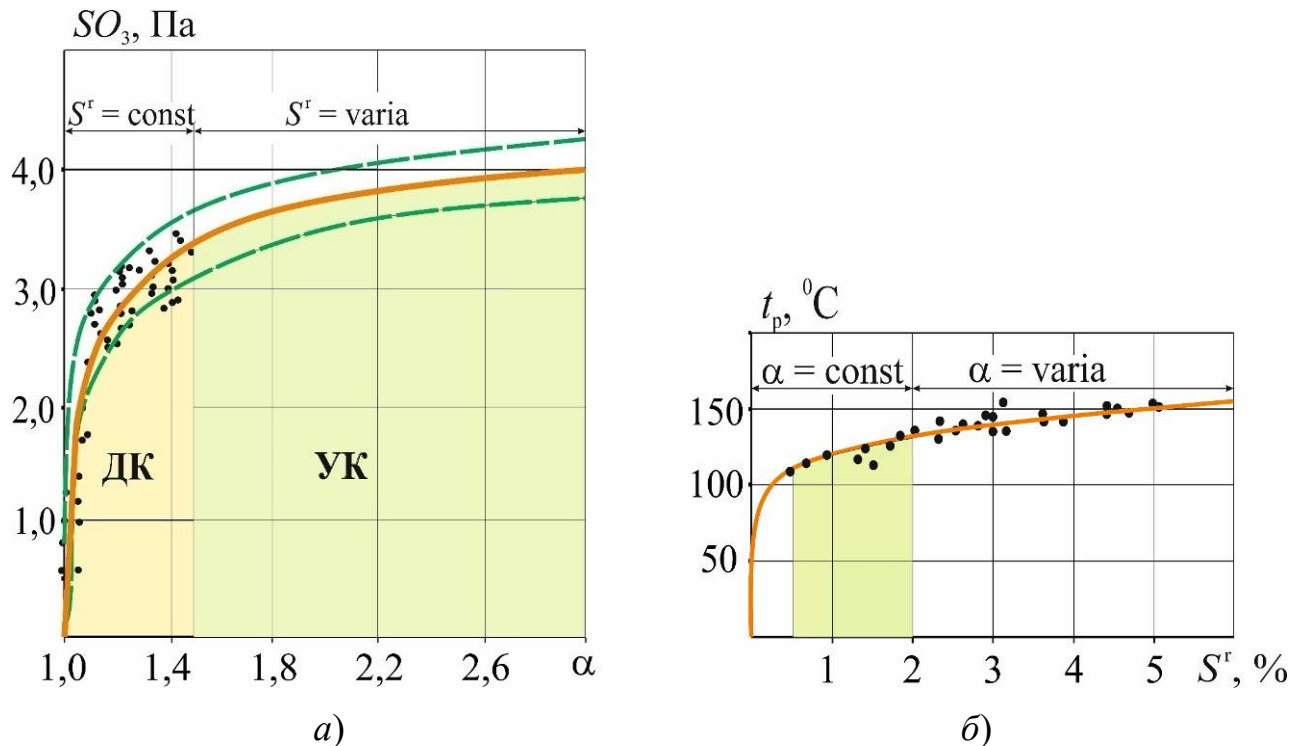


Рис. 2.1. Вплив коефіцієнта надлишку повітря α і вмісту сірки S^r на механізм НТК: а) на концентрацію SO_3 ; б) на температуру точки роси (при $\alpha=1,25$).

Згідно даних рис. 2.1 слід очікувати збільшення інтенсивності НТК при зростанні α від 1,5 до 3,0 в 1,15 рази, а при збільшенні вмісту сірки S^r в паливі від 1,0 до 2,0 – в 1,1 рази.

Структурно-логічна схема (послідовність) проведення аналітичних і експериментальних досліджень теплохімічних процесів в газах і на НТПН УК, дослідження теплопередачі на тепловий опір шару забруднень і тепловіддачу від газів до НТПН при $t_{ст}$ вище і нижче температури точки роси пари сірчаної кислоти $t_{pH_2SO_4}$, а також визначення впливу різних факторів на показники ефективності роботи КЕУ, представлена на рис. 2.2. Структурно-логічна схема дослідження інтенсивності низькотемпературної корозії НТПН і варіантів підвищення показників ефективності КЕУ представлена на рис. 2.3.

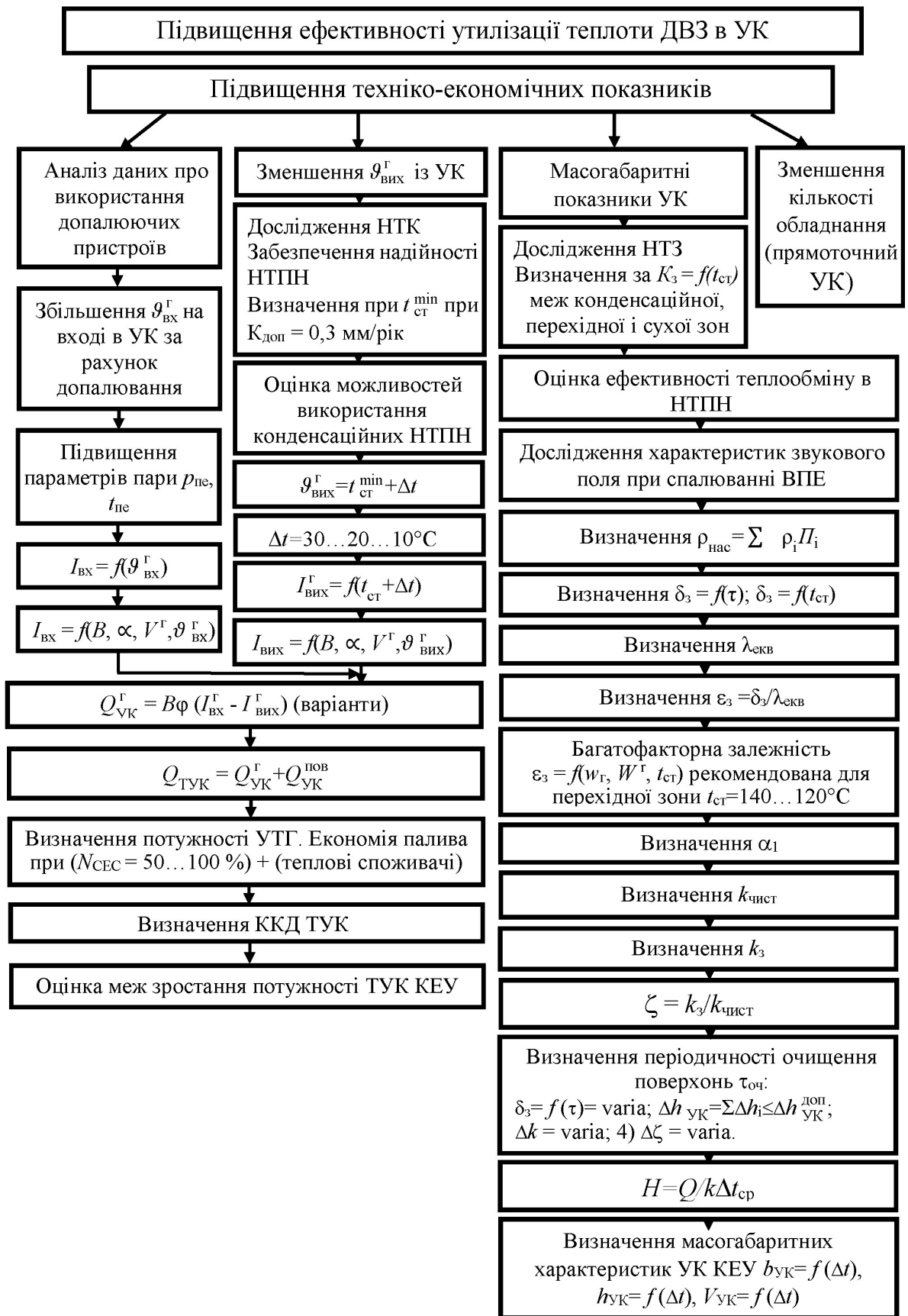


Рис. 2.2. Структурно-логічна схема досліджень процесів, що забезпечують виконання задач дисертаційного дослідження підвищення показників ефективності КЕУ

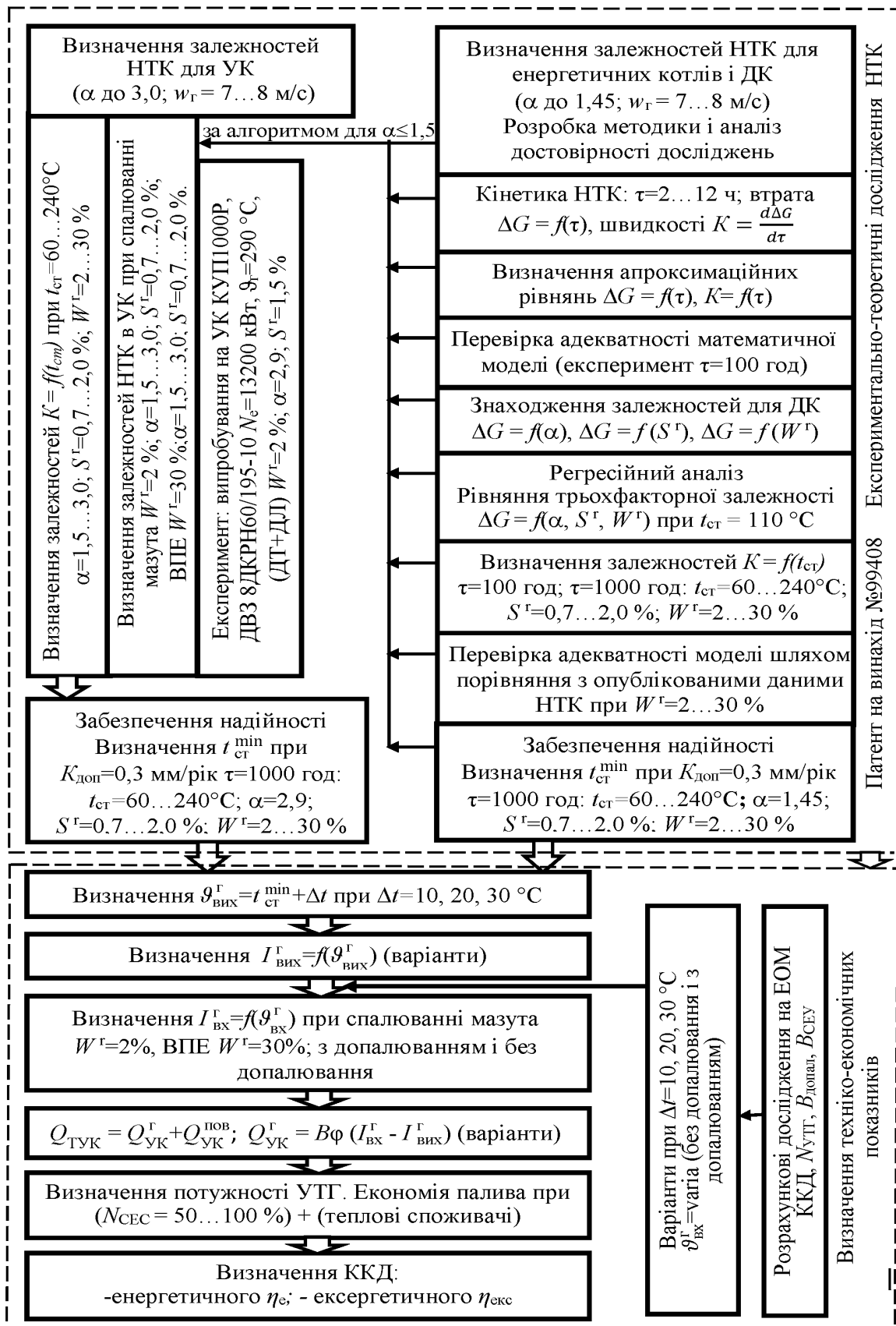
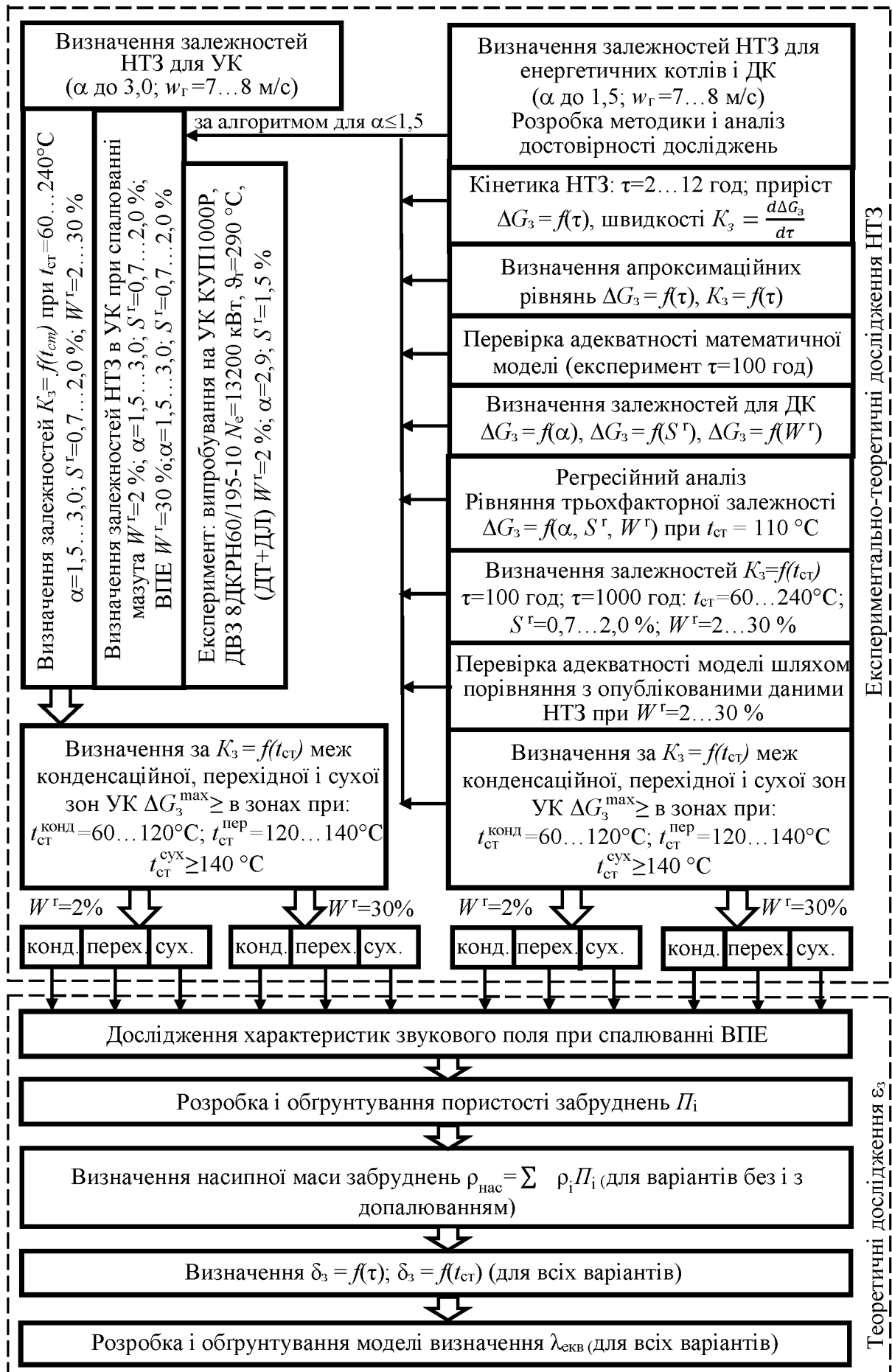


Рис. 2.3. Структурно-логічна схема дослідження інтенсивності низькотемпературної корозії НТПН і варіантів підвищення показників ефективності ККУ



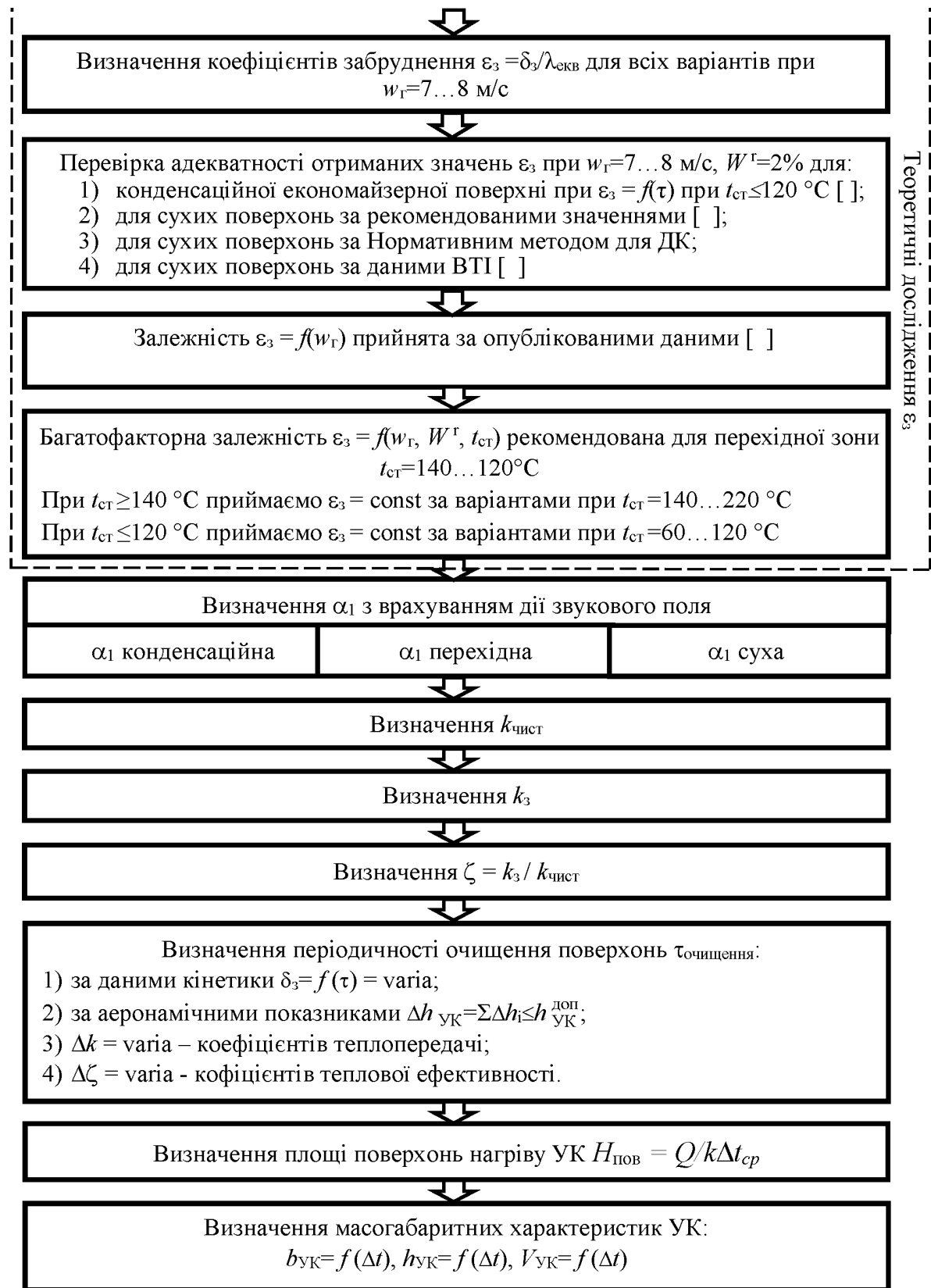


Рис. 2.4. Структурно-логічна схема досліджень інтенсивності забруднень НТПН і визначення термічного опору шару забруднень і масогабаритних характеристик УК

Структурно-логічна схема досліджень інтенсивності забруднень НТПН і визначення термічного опору шару забруднень ε_3 і масогабаритних характеристик УК (рис. 2.4).

В процесі експериментів в камері згоряння установки використовувались мазут і ВПЕ з різним вмістом W^r при значеннях α в межах 1,1...3,0.

Визначення питомої втрати маси металу ΔG_k трубних зразків внаслідок НТК і питомої маси забруднень ΔG_3 на їх зовнішній поверхні здійснювався гравітаційним методом. Збірки з трьох трубних зразків встановлювались в газоході експериментальної установки при швидкості газів 7...8 м/с, при температурі газів ~ 200 °С. Для проведення експериментальних досліджень були виготовлені спеціальні зонди з трубними зразками (рис. 2.5, а).

Зовнішній вигляд збірок до встановлення в газоході і після проведення експерименту представлені на рис. 2.5, а, б.

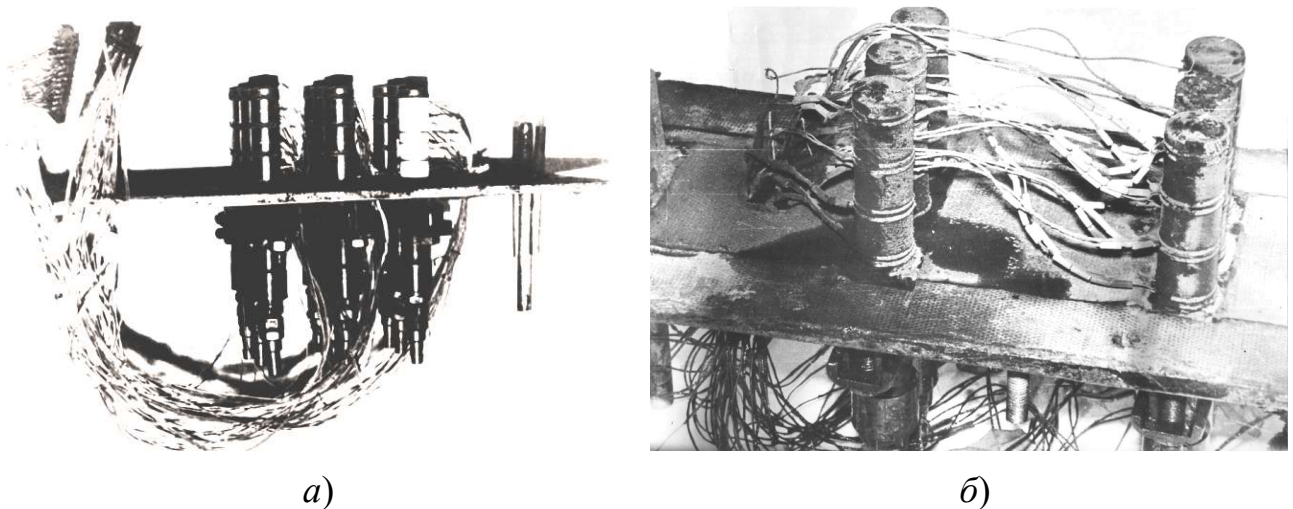


Рис. 2.5. Встановлення зразків для дослідження НТК і НТЗ: а) до випробувань; б) після випробувань

В газоході промислового УК між пакетами встановлювались 4 зонди, що забезпечувало вимірювання втрати маси металу ΔG_k і маси забруднення ΔG_3 через 2, 4, 8 і 12 годин (рис. 2.6, рис. 2.7). Температура газів і зразків вимірювалась за допомогою термопар ХК, які були зачеканені в металеві

прокладки між трубними зразками. Склад газів визначався за допомогою газоаналізаторів ОКСИ-5М і хроматографа.



Рис. 2.6. Вигляд трубного зонду, що встановлювався в газоході УК

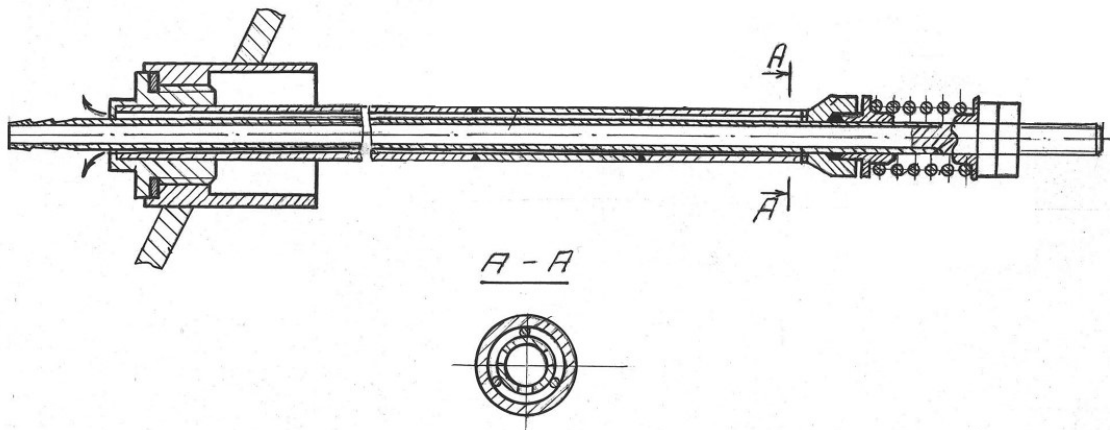


Рис. 2.7. Креслення трубного зонду, що встановлювався в газоході УК

Підготовка ВПЕ до використання в топці експериментального стенду здійснювалась в окремій установці, схема якої представлена на рис. 2.8. У змішувальний бак 1 вводиться паливо і вода в певних кількостях в залежності від необхідного для досліджень значення вмісту води в емульсії. За допомогою насоса 2 забезпечується циркуляція суміші палива і води через диспергатор 3 до тих пір, поки не буде отримана емульсія, в якій краплі води мають діаметр 1,5...30 мкм, що забезпечувало ДІВЕ.

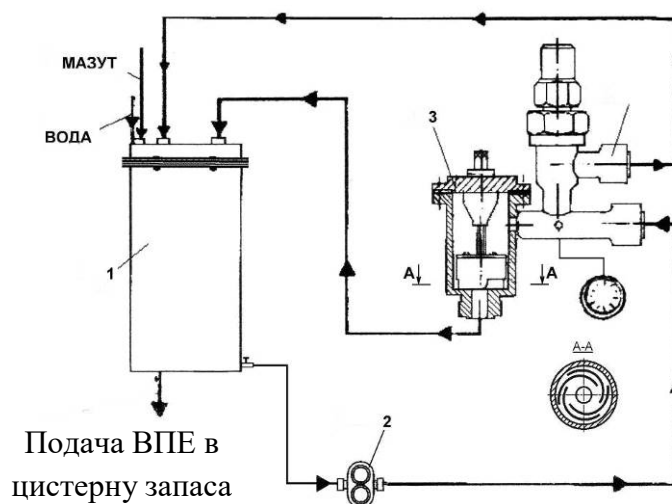


Рис. 2.8. Схема установки для приготування ВПЕ:

1 – цистерна основного запасу; 2 – шестирьончатий насос; 3 – подвійний фільтр

2.1.2 Методика визначення швидкості корозійних процесів

До експерименту проводились заміри геометричних характеристик кожного трубного зразка (середнього значення діаметра за 2 поперечними вимірюваннями і значенням його довжини), що дало можливість визначити зовнішню площу зразка F до випробувань. Після цього виконувалось зважування кожного зразка (до експерименту) – маса m_1 .

Після закінчення експерименту, робочі ділянки з пакетами труб-зразків витягали з газоходу. Обережно зняті з робочих ділянок зразки з продуктами корозії, кислотою і відкладеннями зважувались на аналітичних вагах (маса m_2). Видалення відкладень і продуктів корозії з поверхні металу здійснювалось шляхом обробки зразків в 5 % розчині соляної кислоти, інгібованної уротропіном (1 г на 1 л розчину). Потім зразок промивався у воді і бензині Б-70, висушувався і зважувався вдруге (маса m_3).

Досліди показали, що при такому методі обробки зразків додаткової втрати маси металу зразка (під впливом розчину соляної кислоти) практично не спостерігається.

Швидкість корозії поверхні металу K , г/(м²·год), при певній температурі стінки трубки визначалась за формулою

$$K = \frac{\Delta G_k}{F \cdot \tau}, \quad (2.1)$$

де ΔG_k - втрата маси металу, що визначається як різниця маси зразка до дослідів m_1 і маси зразка m_3 після зняття шару відкладень і продуктів корозії ($\Delta G_k = m_1 - m_3$), г; F - усереднена зовнішня поверхня зразка до дослідів, м^2 ; τ - тривалість дослідів, годин.

Інтенсивність забруднення (сума швидкості відкладення твердих часток і конденсату кислоти з потоку відхідних газів і продуктів корозії) K_3 , $\text{г}/(\text{м}^2 \cdot \text{год})$, визначалася за формулою:

$$K_3 = \frac{\Delta G_3}{F \cdot \tau}, \quad (2.2)$$

де ΔG_3 - маса відкладень і продуктів корозії, таким чином маса забруднень, що визначається як різниця маси зразка із забрудненням m_2 , і маси зразка після видалення забруднень m_3 ($\Delta G_3 = m_2 - m_3$).

Визначення вказаних мас здійснювалось за допомогою лабораторних ваг ВЛА-200. Значення F і τ беруться тими ж, як і при визначенні K . Обробка результатів вимірювань з дослідження кінетики корозійних процесів здійснювалась через 2, 4, 8 і 12 годин, на основі яких одержувались апроксимаційні рівняння. Перевірка достовірності апроксимаційних рівнянь здійснювалась за результатами дослідів впродовж ~ 100 годин.

2.1.4 Оцінка точності корозійних досліджень

У тих випадках, коли число зразків при температурах, що відрізнялись на $1...2$ $^{\circ}\text{C}$, при одному режимі горіння було більше трьох, з'являється можливість визначити ймовірну похибку даної серії дослідів [139]. При дослідженнях кінетики корозійних процесів час проведення дослідів складав 2, 4, 8, 12 год, а перевірка достовірності одержаних рівнянь після 100 годин дослідів. Систематична похибка при визначенні швидкості корозії визначається за формулою:

$$\Delta K = \sqrt{\left(\frac{\Delta m}{\tau \cdot F}\right)^2 + \left(\frac{\Delta m}{\tau^2 \cdot F} \cdot \Delta \tau\right)^2 + \left(\frac{\Delta m}{\tau \cdot F^2} \cdot \Delta F\right)^2}. \quad (2.3)$$

Похибка визначення площі зразка знаходиться за формулою:

$$\Delta F = \sqrt{\left(\frac{\partial F}{\partial d_{\text{зов}}} \cdot \Delta d\right)^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial d_{\text{сеп}}} \cdot \Delta d\right)^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial l} \cdot \Delta L\right)^2}. \quad (2.4)$$

При прийнятих геометричних розмірах зразка $d_{\text{зов}} = 25$ мм, $l = 23$ мм і точності вимірювань діаметра зразка 0,01 мм, а довжини зразка – 0,05 мм значення $\Delta F = 4,05 \cdot 10^{-6}$ м². Поверхня зразка $F = 0,001805$ м². При таких геометричних даних зразків забезпечується точність корозії на рівні 10 % при тривалості дослідження впродовж ~100 годин.

2.2 Методика визначення швидкості корозії і забруднення

За даними [35, 8, 134, 30, 22, 109, 152] розвиток корозійних процесів і забруднення підпорядковується степеневим (або близьким до них) залежностям, для побудови яких досить наявності експериментальних даних тільки в початковий період дії потоку газів при тривалості експериментів 2, 4, 8, 12 годин. Тому за умови підтримки постійних параметрів всіх процесів під час проведення експерименту забезпечується достовірність отримання даних для зазначених вище апроксимаційних рівнянь при проведенні короточасних досліджень кінетики розвитку процесів корозії і забруднення. Швидкість корозії можливо визначити шляхом диференціювання апроксимаційних рівнянь питомої втрати маси металу внаслідок корозії ΔG_k .

Оцінка достовірності отриманих апроксимаційних рівнянь здійснювалась шляхом порівняння розрахункових значень інтенсивності процесів, що розглядаються, з опублікованими тривалими експлуатаційними даними і даними дослідів до 100 годин на цій же експериментальній установці.

За результатами досліджень були знайдені апроксимаційні рівняння кінетики розвитку процесів корозії і забруднення у вигляді степеневих залежностей $\Delta G = A \cdot \tau^n$, де A , n - постійні коефіцієнти для кожного режиму, які і визначають характер кривої. Для пошуку значень коефіцієнтів були

використані математичні засоби програми Advanced Grapher. Були побудовані залежності питомої втрати маси металу внаслідок корозії $\Delta G_k = f(\tau)$ і питомої маси забруднень $\Delta G_z = \varphi(\tau)$, а потім після їх послідовного диференціювання - швидкості корозії $K = f'(\tau) = (\Delta G_k)'$ і забруднення $K_z = \varphi'(\tau) = (\Delta G_z)'$, прискорення корозії $K'' = f''(\tau) = (\Delta G_k)''$ і забруднення $K_z'' = \varphi''(\tau) = (\Delta G_z)''$.

Щоб довести коректність отриманих апроксимаційних рівнянь необхідно отримати залежності НТК і забруднень при тривалих експериментах. Для цього були проведені контрольні досліди тривалістю 100 годин для рідких палив і 88 годин для ВПЕ, використані опубліковані дані [35]. Розбіжність експериментальних даних з розрахунковими даними, отриманими за апроксимаційним рівнянням, складала не більше 10 %, що допустимо при корозійних дослідженнях.

На основі даних короточасних експериментальних досліджень, результати яких представлені в [90], були отримані апроксимаційні рівняння кінетики розвитку корозії і забруднення у вигляді залежностей $\Delta G_k = f(\tau)$ і $\Delta G_z = f(\tau)$, що дозволяють оцінити вплив α , S^r і W^r .

Для оцінки спільного впливу розглянутих 3-х факторів (α , S^r , W^r) на інтенсивність корозії і забруднення ΔG_k і ΔG_z , визначення значень констант і вагових коефіцієнтів в рівнянні багатофакторної регресії, визначення факторів істотного впливу на ΔG_k і ΔG_z , була використана система Statgraphics Plus for Windows, яка забезпечує доступ до повного набору статистичних методів і надає можливість провести розширений регресійний аналіз.

2.3 Визначення теплового опору шару забруднень

При використанні ВПЕ з $W^r = 30\%$ у зв'язку зі зменшенням швидкості НТК до допустимого рівня $\sim 0,25$ мм/рік в області кислотного піка ($t_{ct} = 110^\circ\text{C}$) при $\tau = 1000$ годин при температурах t_{ct} нижче температури точки роси пари H_2SO_4 в УК можлива установка конденсаційних поверхонь нагріву. Тому

прийнято рішення розрізняти на поверхнях нагріву УК залежно від $t_{\text{ст}}$ наявність сухого, адсорбційного, вологого (парорідинного) і мокрого шарів відкладень, стан яких визначає різну товщину і вид забруднень.

Кількість часток, що осіли з потоку, залежить як від концентрації їх в потоці, так і від часу роботи агрегату. Чим довше працює агрегат, тим більше утворюється відкладень, однак це збільшення не безмежне, і для кожних умов через певний час досягається стан стабілізації товщини забруднень, що визначає їх температурний опір. Тому при проведенні теплових розрахунків необхідно враховувати час дії потоку газів на значення товщини забруднень.

На основі проведених експериментальних досліджень кінетики забруднення поверхонь нагріву і отриманих за їх результатами залежностей інтенсивності забруднень від $t_{\text{ст}}$ можливе визначення товщини забруднень δ_z при різних умовах. Для цього необхідно знати реальну густину цих забруднень $\rho_{\text{нас}}$ (так звану насипну густину), що залежить від пористості шару Π , розмірів, форми і упаковки твердих часток, які осідають з потоку відхідних газів на кородуючу конденсаційну поверхню. Достовірність прийнятих припущень впливу звукового поля на пористість оцінювалася за остаточними результатами визначення коефіцієнта забруднення ε_z (розділ 5), які порівнювались з нормативними значеннями для сухих НТПН [136, 142].

Тому необхідне проведення аналітичних досліджень на основі літературних даних можливого значення пористості шару забруднень на сухих і мокрих (конденсаційних) НТПН УК, що представлені в розділі 5.

Для розрахунків інтенсивності теплопередачі необхідно визначити величину середнього значення коефіцієнта забруднення ε_z (їх теплового опору), що визначається відношенням товщини шару забруднень δ_z до значення еквівалентної теплопровідності шару $\lambda_{\text{екв}}$ ($\delta_z/\lambda_{\text{екв}}$). З огляду на складну структуру і багатокomпонентний склад забруднень на різних поверхнях нагріву необхідно знаходження коефіцієнтів еквівалентної теплопровідності $\lambda_{\text{екв}}$ для кожної зони температур стінки.

Значення $\lambda_{\text{екв}}$ для діапазону температур парорідинної зони визначалось за формулою: $\lambda_{\text{екв}} = \lambda_{\text{к}} + (\lambda_{\text{п.к.}} - \lambda_{\text{к}}) \cdot x$, в якій значення коефіцієнтів теплопровідності конденсату сірчаної кислоти $\lambda_{\text{к}}$ і її пари $\lambda_{\text{п.к.}}$ приймалися за довідковими даними в залежності від температури і концентрації кислоти [11].

Інтенсивне акустичне поле, що створюється при використанні ВПЕ згідно літературних даних приводить до збільшення інтенсивності тепловіддачі від газів до поверхні труб УК. Тому необхідні аналітичні дослідження цього явища згідно літературних даних, що приведені в розділі 5.

2.4 Визначення енергетичних та екологічних показників когенераційної установки

Енергоефективність використання палива в різних схемних рішеннях, до складу яких входить КЕУ, можна оцінити за допомогою теплового балансу. При цьому визначається інтегральний показник енергетичної ефективності – коефіцієнт використання теплоти палива (КВТ) [15, 67]. На підставі такого аналізу можливо встановити основні показники ефективності КЕУ. У дисертаційній роботі однієї з цілей є оцінка можливостей застосування ВПЕ при використанні суднових СОД і ВОД і при допалюванні ВПЕ перед УК, якщо необхідно підвищити електричну і (або) теплову потужності КЕУ.

При проведенні розрахункових досліджень техніко-економічних показників схем КЕУ за рахунок використання теплоти відхідних газів в УК і допалювання палива в потоці газів перед УК за базову схему КЕУ прийнята пародизельна установка (ПДУ), що складається із суднового СОД, УК і УТГ. Вважаємо, що схема ПДУ повністю аналогічна схемі ПГУ з ГТУ і УТГ, зважаючи на значення температури газів на вході в УК одного і двох тисків і надлишків повітря, при яких спалюються різні види палив в камерах згоряння ГТУ і ДВЗ. Тоді цілком коректно використати всі досягнення в області удосконалення сучасних ПГУ для пропонованих схем ПДУ. При цьому необхідно відзначити при використанні СОД надається можливість утилізувати

теплоту охолодження наддувного повітря (ОНП), що складає 16 % в тепловому балансі СОД. Це дозволяє суттєво збільшити теплову потужність КЕУ.

Так як у роботі пропонується використовувати суднові ДВЗ, проведено аналіз паливної ефективності когенераційних схем на базі судових СОД типу 16V32 фірми Wartsila як енергогенеруючого когенераційного обладнання, що виробляє теплову та електричну енергію. Завдання: розрахунок теплових балансів когенераційних схем, до складу яких входить цей судновий ДВЗ на різних видах палива з тим, щоб оцінити переваги застосування ВПЕ в ДВЗ.

У роботі [15] представлені основні показники енергетичної ефективності КЕУ:

- електричний ККД установок

$$\eta_{\text{ел}} = \frac{N_{\text{ел}}}{BQ_{\text{H}}^{\text{p}}} \quad (2.5)$$

- тепловий ККД установок

$$\eta_{\text{т}} = \frac{N_{\text{т}}}{BQ_{\text{H}}^{\text{p}}} \quad (2.6)$$

- коефіцієнт використання теплоти палива, який визначає інтегральну енергоефективність установки

$$\eta_{\text{п}} = \frac{N_{\text{ел}} + N_{\text{т}}}{BQ_{\text{H}}^{\text{p}}} \quad (2.7)$$

де $N_{\text{ел}}$ - електрична потужність, кВт;

$N_{\text{т}}$ - теплова потужність, кВт;

B - витрата палива, кг/с;

Q_{H}^{p} - нижча теплота згоряння палива, кДж/кг.

Методика визначення представлена в роботі [85].

Для проведення розрахунків паротурбінної частини КЕУ вихідними даними є і параметри свіжої пари високого (p_1, t_{s1}) і низького ($p_2 > t_{s2}$) тисків, температурний напір $\Delta t_{\text{пу}1}, \Delta t_{\text{пу}2}$, тиск в конденсаторі парової турбіни $p_{\text{к}} = 6$ кПа, ступінь сухості пари $x = 0,892$ на виході з парової турбіни, внутрішній ККД парової турбіни $\eta_{0i} = 0,85$. Прийнято такі позначення: $\vartheta_{\text{г}}$ - температура відпрацьованих газів на вході в УК; $\vartheta_{\text{від}}$ - температура відхідних газів, що йдуть

з УК; $\Delta t_{\text{пе}}$, - перепад температур між димовими газами і перегрітою парою на вході газів в пароперегрівач; $B_{\text{ГТУ}}$ та $B_{\text{д}}$ - витрата палива в ДВЗ і палива, що допаюється, в УК; D_1 , D_2 - паропродуктивність контурів високого і низького тиску; d - відносна паропродуктивність, $d = D_2/(D_1+D_2)$ [137].

При проведенні розрахункових дослідженнях прийнято:

- електричний генератор: ККД електричного генератора $\eta_{\text{ег}} = 98 \%$; ККД понижуючого редуктора для двигунів з частотою обертання силового валу $n > 3000$ об/хв $\eta_{\text{ред}} = 98 \%$;

- УК: температурний напір на вході до пароперегрівачу $\Delta t_{\text{пе}} = 20$ °С (при $\vartheta_0 < 550$ °С), температурний напір на «холодному кінці» випарної поверхні $\Delta t_{\text{пу}} = 10$ °С, недогрів води в економайзері $\Delta t_{\text{ек}} = 10$ °С, коефіцієнт збереження теплоти $\varphi = 0,97$;

- ПТУ: відносний внутрішній ККД проточної частини $\eta_0 = 0,8$ (у зоні вологої пари вводилась поправка на вологість), тиск відпрацьованої пари у конденсаторі $p_{\text{к}} = 6$ кПа, тиск у деаераторі живильної води $p_{\text{д}} = 0,12$ МПа.

При аналізі ефективності СДП з урахуванням підйому параметрів пари використовувалися такі показники [69]:

- ККД ПГУ

$$\eta_{\text{ПГУ}} = \frac{N_{\text{ДВЗ}} + N_{\text{ПТ}}}{(B_{\text{ДВЗ}} + B_{\text{д}}) Q_{\text{н}}^{\text{р}}} \quad (2.8)$$

- ККД УК

$$\eta_{\text{УК}} = \frac{T_{\text{УК}} - T_{\text{від}}}{T_{\text{УК}}} \quad (2.9)$$

- ККД парового циклу

$$\eta_{\text{пц}} = \frac{N_{\text{ПТ}}}{[B_{\text{ДВЗ}}(1 - \eta_{\text{ГТУ}}) + B_{\text{д}}] Q_{\text{н}}^{\text{р}} \eta_{\text{УК}}} \quad (2.10)$$

- ККД вироблення додаткової енергії

$$\eta_{\text{д}} = \frac{N_{\text{ПТ}} - N_{\text{ПТ}}^0}{B_{\text{д}} Q_{\text{н}}^{\text{р}}} \quad (2.11)$$

Відносний приріст потужності парової турбіни в варіантах ПДУ з допалюванням визначався за виразом

$$\Delta N_{\text{пт}} = \frac{N_{\text{пт}} - N_{\text{пт}}^0}{N_{\text{пт}}^0}, \quad (2.12)$$

де $N_{\text{пт}}$, $N_{\text{пт}}^0$ - значення потужності ПТУ в ПГУ з допалюванням і в бінарній ПГУ.

Відносна витрата додаткового палива визначалась як

$$\beta_d = B_d / B_{\text{ГТУ}}. \quad (2.13)$$

Варіант розрахунку при ($\beta_d = 0$) відповідав бінарній ПГУ.

Наступні варіанти розрахунків схеми двох тисків виконували при поступово збільшених витратах додаткового палива і відповідно піднятих параметрах свіжої пари контуру високого тиску.

Після досягнення параметрів пари контуру високого тиску 9 МПа і 520...540 °С подальше зростання β_d супроводжувалось збільшенням теплоперепаду $\Delta t_{\text{пс1}}$ при зафіксованих зазначених вище значеннях p_1 , t_1 . У всіх варіантних розрахунках витримували незмінними значення температурних напорів за елементами УК, внутрішнього ККД парової турбіни (ПТ). Ступінь сухості пари на виході ПТ зберігали постійною, визначаючи необхідний тиск p за методом послідовних наближень. Для цього були розраховані і уточнені наступні параметри за існуючими методиками [17, 136]: кількість теплоти, яку потрібно отримати в камері допалювання, щоб збільшити паропродуктивність УК, що забезпечить максимальне її значення, допустиме за умовами підвищення параметрів пари; витрата палива в камері допалювання; максимальна електрична і теплова потужність ПТУ з допалюванням палива; зміна ККД ПДУ при допалюванні палива.

При аналізі результатів розрахунків КЕУ з ДВЗ було прийнято допущення, що відсутній перерозподіл витрати пари на теплову і електричну потужність. Таким чином, при розрахунку максимальної електричної потужності вся теплота, що вноситься допалюванням, витрачається на збільшення тільки електричної потужності (без зміни теплової), а при розрахунку максимальної теплової потужності - на збільшення тільки теплової потужності (без зміни електричної).

Можливо 2 варіанти: 1) при незмінних початкових параметрах пари, коли додаткове використання палива збільшує витрату пари і, отже, потужність ПТУ (підвищення економічності циклу ПТУ при цьому не відбувається). При використанні ВПЕ з водовмістом 20...30% можливо досягти збільшення ККД УК за рахунок зниження температури відхідних газів $\vartheta_{\text{від}}$; 2) при переході на нові, більш високі параметри в паротурбінній частині, коли відбувається зміна як витрати пари, так і теплоперепада, що спрацьовується в ПТ в зв'язку з чим змінюються і електрична потужність і економічність ПТУ.

На думку [151] в одноконтурній схемі КЕУ ККД виробництва електроенергії конденсаційної ПГУ при використанні допалювання палива буде підвищуватися в тому випадку, коли відносний приріст електричної потужності ПТУ в складі як ПДУ, так і ПДУ внаслідок допалювання буде більше, ніж відносний приріст додаткової кількості палива, що підводиться до установки в цілому:

$$\frac{\partial N_{\text{ПТУ}}^e(\beta_d)}{N_{\text{ПГУ}}^e(\beta_d)} > \frac{\partial \beta_d}{1 + \partial \beta_d}, \quad (2.14)$$

де $N_{\text{ПТУ}}^e$ і $N_{\text{ПГУ}}^e$ - електрична потужність ПТУ і ПГУ відповідно, кВт; β_d - ступінь допалювання палива в УК.

Додаткове використання палива перед УК без подачі додаткового повітря за умовою сталого горіння можливо при достатній концентрації окислювача в потоці відпрацьованих газів за ГТУ і ДВЗ - $O_2 > 12...14\%$ (коефіцієнт надлишку повітря $\alpha > 2$). Тому подача додаткового повітря для допалювання палива не потрібно. Для більшості сучасних ГТУ і ДВЗ надлишок повітря в вихлопних газах становить $\alpha = 3...4$, а їх температура – $450...580\text{ }^\circ\text{C}$ [143], а сучасних суднових СОД – $350\text{ }^\circ\text{C}$, ВОД – $400\text{ }^\circ\text{C}$, $\alpha = 2...3$.

Розрахунок валових викидів забруднюючих речовин, що містяться в продуктах згоряння палива когенераційної ПДУ, проводився за допомогою методики [27, 70] на підставі літературних даних для конкретних ДВЗ [116, 115], а також первинних вимірів складу відхідних газів і токсичних інгредієнтів (NO_x , SO_2) при проведенні досліджень на експериментальній установці.

Для зіставлення штатних і експериментальних вимірювань концентрації O_2 проводиться перерахунок штатних показань з введенням поправки на об'ємну частку водяної пари (r_{H_2O}): $O_2^{сух} = \frac{O_2^{шт}}{1 - r_{H_2O}}$.

Значення концентрації NO_x і CO , що відносяться до димових газів котла, наведені до нормативного значення $O_2^{норм} = 5\%$, а до димових газів за ДВЗ і ГТУ і окислювача - до нормативного для ДВЗ і ГТУ $O_2^{норм} = 15\%$.

Висновки по розділу 2

1. Розроблена структурно-логічна схема проведення аналітичних і експериментальних досліджень теплохімічних процесів на низькотемпературних поверхнях нагріву УК.

2. Для скорочення тривалості трудомістких дослідів, можливості прогнозувати розвиток процесів забруднення, визначення механізму цих процесів необхідне проведення експериментальних досліджень кінетики їх розвитку.

3. Для визначення впливу розглянутих факторів необхідно отримання експериментальних залежностей інтенсивності корозії і забруднення НТПН від температури стінки, водовмісту емульсії, вмісту сірки у вихідному паливі і коефіцієнта надлишку повітря.

4. Оцінка впливу різних чинників на інтенсивність теплообміну, забруднення низькотемпературних поверхонь нагріву, масогабаритні показники можлива шляхом проведення теплових розрахунків УК на ЕОМ з використанням нормативних методик з урахуванням результатів наших експериментальних досліджень забруднення і ступеня його впливу на процес теплопередачі.

Результати досліджень в розділі з даної дисертаційної роботи знайшли своє відображення в наступних публікаціях автора [91, 90, 46, 89]

РОЗДІЛ 3

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ КОРРОЗІЇ І ЗАБРУДНЕННЯ ПОВЕРХОНЬ НАГРІВУ УТИЛІЗАЦІЙНИХ КОТЛІВ ПРИ ВИКОРИСТАННІ ВОДОПАЛИВНИХ ЕМУЛЬСІЙ

3.1 Кінетика процесів корозії і забруднення

Використання ВПЕ в двигунах дозволяє покращити процеси використання високов'язких палив, забезпечити їх економію, знизити емісію сажових часток, поліпшити екологічні показники (викиди NO_x , CO).

Інтенсивність процесів корозії залежить в основному від вмісту сірки в паливі S^r , коефіцієнта надлишку повітря α , при якому відбувається горіння, вмісту води в паливі W^r (або в ВПЕ), температур поверхні нагріву. З огляду на викладене, були поставлені відповідні цілі досліджень.

При створенні моделі розвитку процесу забруднення для визначення періодичності очищення поверхонь нагріву, пов'язаної зі збільшенням аеродинамічного опору тракту і зниженням інтенсивності теплопередачі, що приводить до зменшення теплової потужності УК (його паропродуктивності), необхідно знати кінетику розвитку процесів корозії і забруднення низькотемпературних поверхонь нагріву УК.

Дослідження були проведені на експериментальній установці в Херсонській філії НУК і під час ходових випробувань судна-постачальника з головним двигуном 8ДКРН 60/195-10 потужністю 13200 кВт, після якого встановлений УК марки КУП1000Р. Під час ходових випробувань в камері згоряння двигуна використалась суміш палив (ДП + ДЛ) з вмістом: сірки $S^r = 1,5 \%$, води $W^r = 2 \%$, золи на рівні $0,01 \%$. Сумарний надлишок повітря становив $\alpha = 2,9$.

Для дослідження процесів кінетики розвитку процесів корозії на експериментальній установці було проведено 25 серій дослідів при

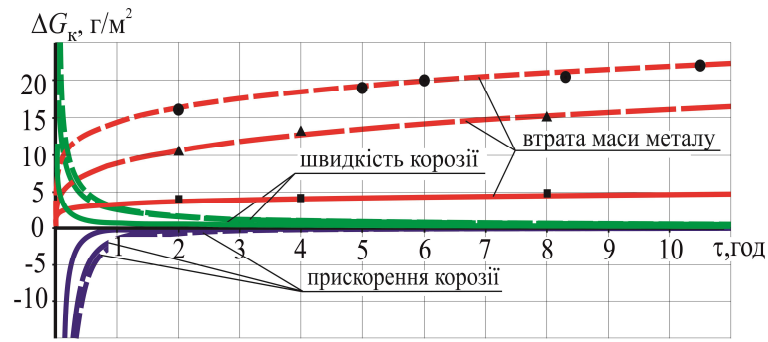
використанні різних рідких палив (ДС, М40, М100) при τ від 2 до 12 годин, при вмісті сірки S^r в паливах від 0,7 % до 2,0 %, при α від 1,01 до 1,5, при вмісті води 2 %, а також ВПЕ на основі М40 з вмістом води від 4 до 30 %, при α від 1,15 до 1,5. Для вивчення кінетики розвитку процесів забруднення було проведено 12 серій дослідів при використанні мазутів (М40, М100) при вмісті S^r від 0,98 % до 2,0 %, при α від 1,01 до 1,5, при вмісті води 2 %, а також ВПЕ на основі М40 з водовмістом від 2 до 30 %, при α від 1,2 до 1,5.

За результатами досліджень були знайдені апроксимаційні рівняння кінетики розвитку процесів корозії і забруднення.

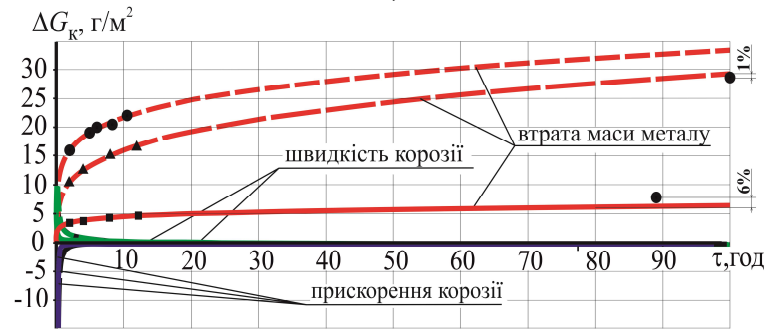
Графіки і рівняння апроксимації, отримані в результаті обробки результатів експериментів, а також значення коефіцієнтів детермінації R^2 для залежностей ΔG_k і ΔG_z від часу впливу потоку газів τ при їх температурі на рівні 250 °С і температурі стінки 110 °С, що відповідає "кислотному піку", представлені на рис. 3.1 і рис. 3.2.

На рис. 3.1, а і 3.2, а представлені результати досліджень кінетики корозії і забруднення при τ до 12 годин, за якими одержано апроксимаційні рівняння (див. підписи). Як показали результати досліджень кінетики розвитку корозії і забруднення для трьох режимів (рис. 3.1, а і 3.2, а) після закінчення 5...8 годин впливу потоку газів настає динамічна рівновага. Тому порівняння корозійних режимів при використанні рідких палив і ВПЕ і оцінка впливу на них α , S^r і W^r можуть бути достовірно виконані за результатами 8-годинних дослідів на експериментальній установці. Коректність отриманих рівнянь підтверджується високими значеннями коефіцієнтів детермінації R^2 (див. підписи) [90].

Порівняння залежностей показує, що при однаковому вмісті сірки, при підвищених надлишках повітря $\alpha = 2,9$ інтенсивність корозії вище. Використання емульсії з $W^r = 30$ % призводить до зниження інтенсивності НТК в 5 разів.



а)



б)

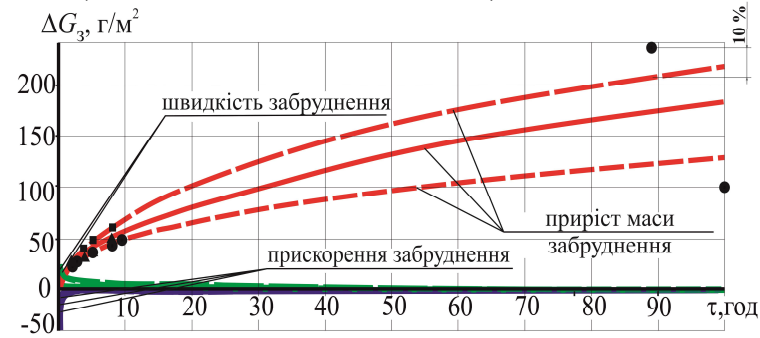
Рис. 3.1. Дослідження кінетики низькотемпературної корозії:

а) при τ до 12 годин; б) при τ до 100 годин;

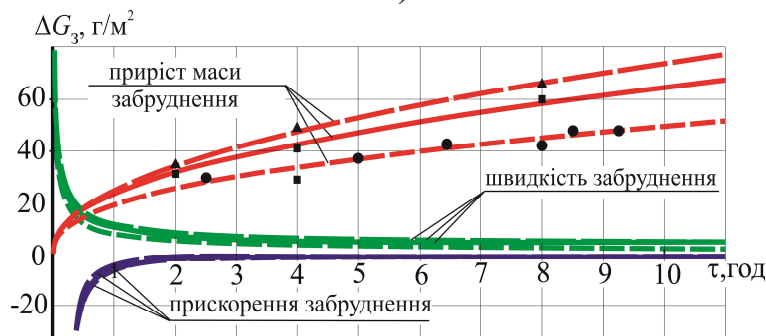
----- ДП+ДС ($S^r = 1,5\%$; $\alpha = 2,9$; $W^r = 2\%$), $\Delta G_k = 14,0884\tau^{0,1866}$, $R^2 = 0,9877$;

===== М40 ($S^r = 1,5\%$; $\alpha = 1,25$; $W^r = 2\%$), $\Delta G_k = 8,7075\tau^{0,2633}$, $R^2 = 0,9983$;

===== М40 ($S^r = 1,8\%$; $\alpha = 1,45$; $W^r = 30\%$), $\Delta G_k = 4,3186\tau^{0,3015}$, $R^2 = 0,9996$.



а)



б)

Рис. 3.2. Дослідження кінетики процесів забруднення:

а) при τ до 12 годин; б) при τ до 100 годин;

----- ДП+ДС ($S^r = 1,5\%$; $\alpha = 2,9$; $W^r = 2\%$), $\Delta G_3 = 18,9182\tau^{0,4167}$, $R^2 = 0,9017$;

===== М40 ($S^r = 1,5\%$; $\alpha = 1,25$; $W^r = 2\%$), $\Delta G_3 = 23,1091\tau^{0,6967}$, $R^2 = 0,9856$;

===== М40 ($S^r = 1,5\%$; $\alpha = 1,25$; $W^r = 30\%$), $\Delta G_3 = 15,6212\tau^{0,6656}$, $R^2 = 0,9917$.

Щоб довести коректність отриманих апроксимаційних рівнянь необхідно отримати залежності НТК і забруднень при тривалих експериментах (див. рис. 3.1, б і 3.2, б). Для цього були проведені контрольні досліди тривалістю 100 годин для рідких палив і 88 годин для ВПЕ, використані опубліковані дані [35]. Розбіжність експериментальних даних з розрахунковими даними, отриманими за апроксимаційним рівнянням, складає не більше 10 %, що допустимо при корозійних дослідженнях [22, 109, 139].

На основі даних короточасних експериментальних досліджень, результати яких представлені в [90], були отримані апроксимаційні рівняння кінетики розвитку процесів корозії і забруднення у вигляді залежностей $\Delta G_k = f(\tau)$ і $\Delta G_z = f(\tau)$, що дозволяють оцінити вплив α , S^r і W^r .

3.2 Інтенсивність корозійних процесів на низькотемпературних поверхнях нагріву

При плануванні проведення короточасних експериментальних досліджень необхідно врахувати механізм впливу α і S^r на інтенсивність корозійних процесів в розглянутому діапазоні їх зміни. Інтенсивність корозійних процесів визначається впливом α і S^r на утворення SO_3 і кількість пари H_2SO_4 , при конденсації якої починається розвиток НТК і осадження твердих часток. В межах зростання α від 1,01 до 1,1 спостерігається стрімке зростання вмісту SO_3 (рис. 2.1, а), а значить і зростання кількості пари H_2SO_4 . Потім при більш високих α має місце стабілізація вмісту SO_3 . У межах зміни вмісту сірки від 0 до 1 % має місце стрімке зростання температури точки роси t_p (рис. 2.1, б), значення якої також характеризує вміст пари H_2SO_4 у відпрацьованих газах і підпорядковується степеневій залежності. При S^r більше 1 % відбувається стабілізація значення температури t_p [109].

Аналіз даних, представлених на рис. 2.1, вказує на те, що розвиток корозійних процесів в залежності від α і S^r достовірно описується степеневими залежностями. Також вид залежності і рівень розвитку інтенсивності НТК і

забруднення НТПН УК можливо визначити за даними на початковій ділянці досліджуваних залежностей від α і S^r (див. рис. 2.1). Тому слід вважати коректним отримання апроксимаційних рівнянь $\Delta G_k = f(\alpha)$ і $\Delta G_3 = f(\alpha)$ за даними досліджень на експериментальній установці при значеннях α від 1,05 до 1,5, а потім оцінити достовірність цих рівнянь стосовно до процесів в УК за значеннями ΔG_k і ΔG_3 при $\alpha = 2,9$, отриманих при проведенні експериментів на УК під час ходових випробувань на судні.

Для досліджень діапазон зміни W^r необхідно вибирати в межах від 2 % до 40 %, так як при збільшенні W^r має місце суттєве зниження інтенсивності НТК (за даними [35]) і забруднення НТПН [8] при $t_{ст}$ нижче температури точки роси пари H_2SO_4 . З огляду на різні підходи до оцінки водовмісту, необхідно відзначити, що при приготуванні ВПЕ водовмістом, наприклад, 30% змішувалися вода і паливо в співвідношенні 300 г води G_v і 700 г палива G_n , що означає 30 % води в 1 кг ВПЕ (позначається $W^r = 30 \%$). Цьому відповідає водопаливне відношення $G_v/G_n = (300/700) \cdot 100 \% = 42,86 \%$.

Для побудови шуканих залежностей $\Delta G_k = f(\alpha)$ і $\Delta G_3 = f(\alpha)$ були обрані результати 8-годинних досліджень на підставі короточасних експериментальних досліджень і отриманих апроксимаційних рівнянь кінетики розвитку корозії і забруднення теж у вигляді степеневих залежностей $\Delta G_k = f(\tau)$ і $\Delta G_3 = f(\tau)$ при впливі α , S^r і W^r .

Як показують представлені на рис 3.3, а залежно $\Delta G_k = f(\alpha)$, отримані на експериментальній установці, при однаковому вмісті сірки в паливі ($S^r = 1,5 \%$) при $W^r = 2 \%$ в паливі і W^r в емульсії 15 і 30 %, зі збільшенням α спостерігається зростання ΔG_k при будь-яких значеннях W^r в емульсії.

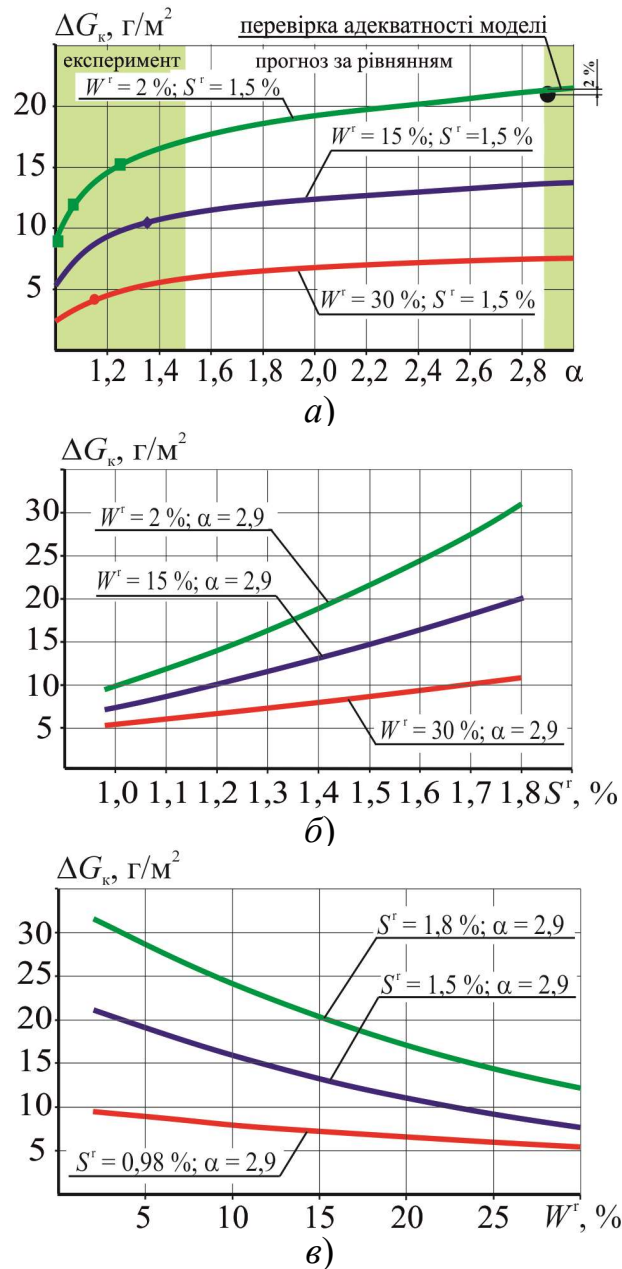


Рис. 3.3. Залежність питомої втрати маси металу ΔG_k в області кислотного піка ($t_{\text{ст}} = 110^\circ\text{C}$) при $\tau = 8$ год:

- а) $\Delta G_k = f(\alpha)$ при $S^r = 1,5\%$ і $W^r = 2, 17$ і 30% ;
 $W^r = 2\%$: $\Delta G_k = 13,9516 \alpha^{0,3841}$, $R^2 = 0,9999$;
 $W^r = 15\%$: $\Delta G_k = 8,9149 \alpha^{0,5134}$, $R^2 = 1$;
 $W^r = 30\%$: $\Delta G_k = 4,2105 \alpha^{0,568}$, $R^2 = 0,8852$;
б) $\Delta G_k = f(S^r)$ при $\alpha = 2,9$ і $W^r = 2, 17$ і 30% ;
 $W^r = 2\%$: $\Delta G_k = 9,8129 S^{1,9308}$, $R^2 = 0,9989$;
 $W^r = 15\%$: $\Delta G_k = 7,4156 S^{1,6821}$, $R^2 = 0,9895$;
 $W^r = 30\%$: $\Delta G_k = 5,2975 S^{1,2173}$, $R^2 = 0,8956$;
в) $\Delta G_k = f(W^r)$ при $\alpha = 2,9$ і $S^r = 0,98, 1,5$ і $1,8\%$;
 $S^r = 1,8\%$: $\Delta G_k = 33,7985 e^{-0,0341 W^r}$, $R^2 = 0,9975$;
 $S^r = 1,5\%$: $\Delta G_k = 22,783 e^{-0,0363 W^r}$, $R^2 = 0,9941$;
 $S^r = 0,98\%$: $\Delta G_k = 9,8871 e^{-0,0202 W^r}$, $R^2 = 0,9999$.

Однак, якщо при використанні рідкого палива ($W^r = 2\%$) при збільшенні α з 1,05 до 2,9 ΔG_k зросла в 2,2 рази, то при використанні ВПЕ з $W^r = 30\%$ - в 1,9 рази, але на істотно більш низькому рівні інтенсивності НТК. При використанні ВПЕ з $W^r = 30\%$ значення ΔG_k в 2,8 рази нижче, ніж при використанні рідкого палива при $\alpha = 2,9$. Достовірність результатів, розрахованих за рівняннями $\Delta G_k = f(\alpha)$, була оцінена шляхом порівняння розрахункового значення ΔG_k при $\alpha = 2,9$ з даними експериментальних досліджень при використанні суміші палив (ДП + ДЛ) ($W^r = 2\%$ і $S^r = 1,5\%$) $\alpha = 2,9$ на судні під час ходових випробувань на УК типу КУП1000Р, встановленого після ГД марки 8ДКРН 60/195-10. Розбіжність склала 1,9 % (рис. 3.3, а).

Отже, рівняння, отримані за даними результатів досліджень НТК при α в діапазоні 1,05...1,5 (див. підписи до рисунків), достовірно описують хід процесу і значення швидкості НТК і в УК після ДВЗ при великих α . Це підтверджується однаковими значеннями співвідношень між величинами ΔG_k при W^r , рівних 2, 15 і 30 %, що становлять відповідно (3; 2; 1) при $\alpha = 1,05$ і при $\alpha = 2,9$, хоча абсолютні значення ΔG_k при $\alpha = 2,9$ природно вище.

Це дозволяє зробити висновок, що прийнята методика визначення залежностей питомої втрати маси металу ΔG_k шляхом побудови рівнянь, отриманих при менших значеннях α , за якими представлена достатня кількість публікацій [35, 46], коректна і забезпечує отримання достовірних даних і при великих α . Тому вважаємо, що експериментальні дані розвитку процесів корозії і забруднення в інших режимах, отримані на експериментальній установці при використанні ВПЕ, також достовірні при розгляді корозійних процесів в УК.

Представлені на рис. 3.3, б залежності (питомої втрати маси металу внаслідок корозії) $\Delta G_k = f(S^r)$ при однаковому значенні $\alpha = 2,9$ при вмісті W^r в паливі 2 % і в емульсії 15 і 30 % показали, що при використанні палива ($W^r = 2\%$) при збільшенні S^r з 0,98 до 1,8% ΔG_k збільшилась в 3,9 рази, а при використанні ВПЕ ($W^r = 15\%$) - в 3,2 рази при тих же умовах. При

використанні ВПЕ з $W^r = 30\%$ спостерігається менше зростання ΔG_k : при збільшенні S^r з 0,98 до 1,8% значення ΔG_k збільшилось у 2,3 рази. При цьому також необхідно відзначити, що значення питомої втрати маси металу ΔG_k при використанні ВПЕ ($W^r = 30\%$) в 1,7 рази нижче, ніж при використанні рідкого палива ($W^r = 2\%$) при $S^r = 0,98\%$ і в 2,6 рази нижче при $S^r = 1,8\%$.

На основі даних $\Delta G_k = f(\alpha)$ і $\Delta G_k = f(S^r)$ (рис. 3.3, а, б) отримані залежності $\Delta G_k = f(W^r)$ при S^r , рівних 0,98, 1,5 і 1,8 % при $\alpha = 2,9$ (рис. 3.3, в). Отримані залежності показали, що зі збільшенням W^r в емульсії ΔG_k знижується. Чим вище вміст сірки в паливі, тим крутіше знижується крива залежності $\Delta G_k = f(W^r)$. При $S^r = 0,98\%$ при збільшенні вмісту води в паливі та ВПЕ від 2 до 30 % ΔG_k знижується в 1,7 рази, при $S^r = 1,8\%$ в тих же межах зміни W^r ΔG_k знижується в 2,6 рази.

Те, що значення ΔG_k при різних S^r суттєво зближуються при $W^r = 30\%$ (рис. 3.3, в) пояснюється тим, що при цьому W^r в емульсії створюються умови для пасивації металу і різкого зниження швидкості НТК [134].

Щоб оцінити спільний вплив розглянутих 3-х факторів (α , S^r , W^r) на швидкість корозії у вигляді ΔG_k , визначити значення констант і вагових коефіцієнтів в рівнянні багатофакторної регресії, визначитися з факторами істотного впливу на ΔG_k при статистичній обробці експериментальних даних, була використана система STATGRAPHICS Plus for Windows, яка забезпечує доступ до повного набору статистичних методів і надає можливість провести розширений регресійний аналіз. Один з модулів цієї системи, присвячений плануванню експериментів, дає можливість врахувати взаємодію аналізованих факторів на величину ΔG_k .

Так як був обраний повний факторний ротатабельний план (необхідно 16 спостережень), то за результатами розрахунку були отримані всі головні ефекти і двохфакторні взаємодії. Статистична обробка даних дозволила отримати рівняння, що враховує вплив на величину ΔG_k коефіцієнта надлишку повітря α , вмісту сірки S^r в паливі та води W^r у ВПЕ у вигляді

$$\Delta G_k = -2,52262 + 0,450857W^r - 8,57701\alpha + 17,0426S^r + 0,0101935(W^r)^2 - \\ -0,0730657W^r\alpha - 0,727298W^rS^r + 2,01146\alpha^2 + 0,326722\alpha S^r + 3,32115(S^r)^2$$

За отриманою діаграмою Парето (рис. 3.4, в) видно, що вміст сірки S^r (фактор С), вміст W^r в емульсії (фактор А) і коефіцієнт надлишку повітря α (фактор В) мають статистично значимі ефекти. На це вказує те, що відповідні стовпці перетинають вертикальну лінію, яка відповідає 95 % рівню ймовірності для визначення значимості впливу факторів.

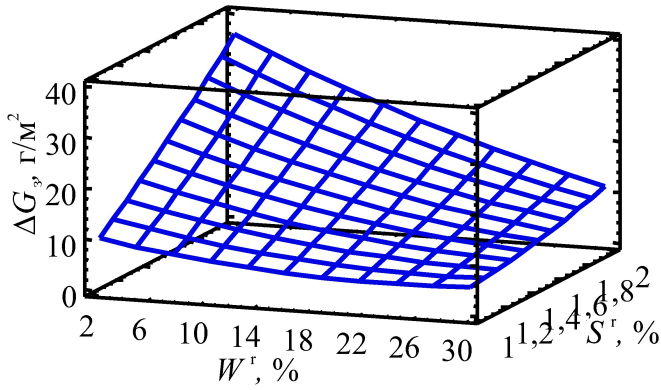
Таким чином, підбиваючи підсумок аналізу результатів проведених експериментів і їх статистичної обробки, можна з великою часткою впевненості стверджувати, що на величину ΔG_k впливає, перш за все, вміст сірки S^r в паливі, а потім вміст води W^r в ВПЕ і коефіцієнт надлишку повітря α .

Графіки головних ефектів і взаємодій показують, що найменші значення ΔG_k при $S^r = 1,5 \%$ і $\alpha = 2,9$ можуть бути отримані при $W^r = 25...30 \%$.

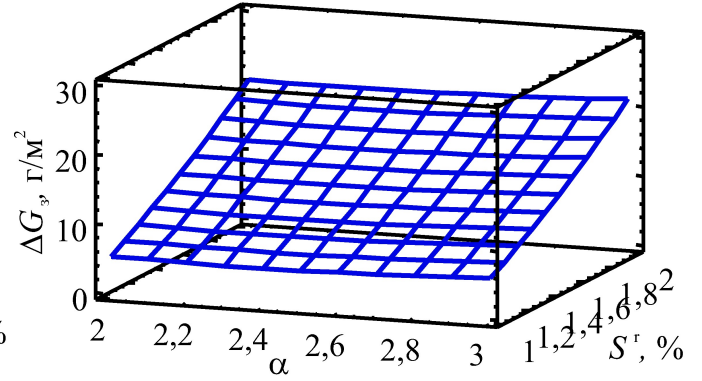
Для більш детального розгляду області оптимуму доцільно застосувати контурний графік. Контурний графік показує: мінімальна питома втрата маси металу ΔG_k спостерігається, коли W^r перебуває між 14 і 30 % і $S^r = 1,0...1,2 \%$ при $\alpha = 2,9$ (рис. 3.4, а); при $S^r = 1,5 \%$ при значеннях $W^r = 27...30 \%$, $\alpha = 2,5...3,2$ (рис. 3.4, б).

Достовірність отриманих залежностей ΔG_k і ΔG_z при $\tau = 8$ годин можна оцінити тільки шляхом порівняння з результатами тривалих дослідів. Дослідження тривалістю 100 годин, протягом яких стабілізуються всі процеси, надають можливість достовірно провести ці порівняння і оцінити точність прогнозу розвитку корозійних процесів на тривалий час при використанні ВПЕ, що нас цікавить перш за все. Порівняльна оцінка інтенсивності НТК проведена за залежностями швидкості корозії від температури стінки.

Тривимірна поверхня при $\alpha = 2,9$

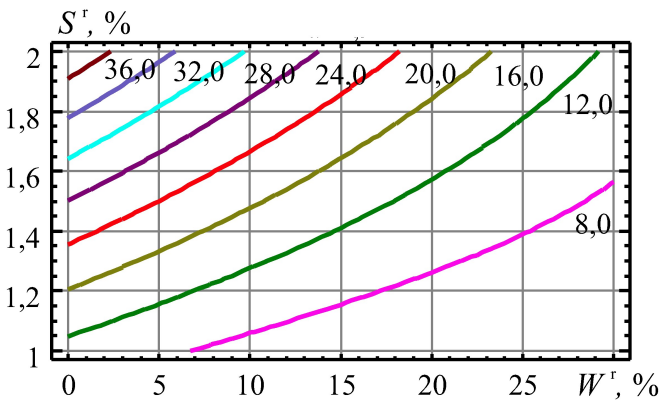


Тривимірна поверхня при $W^r = 17\%$



Контурна поверхня

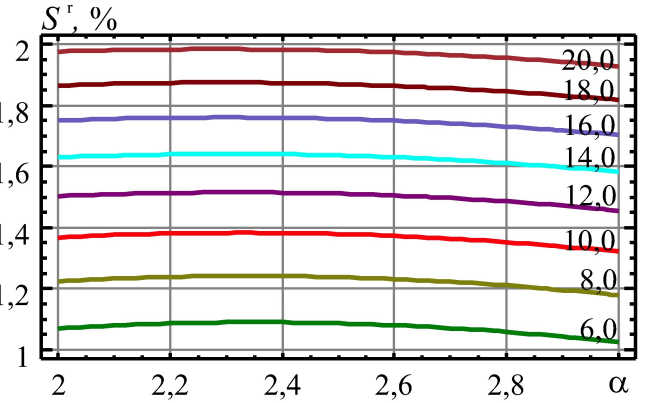
при $\alpha = 2,9$



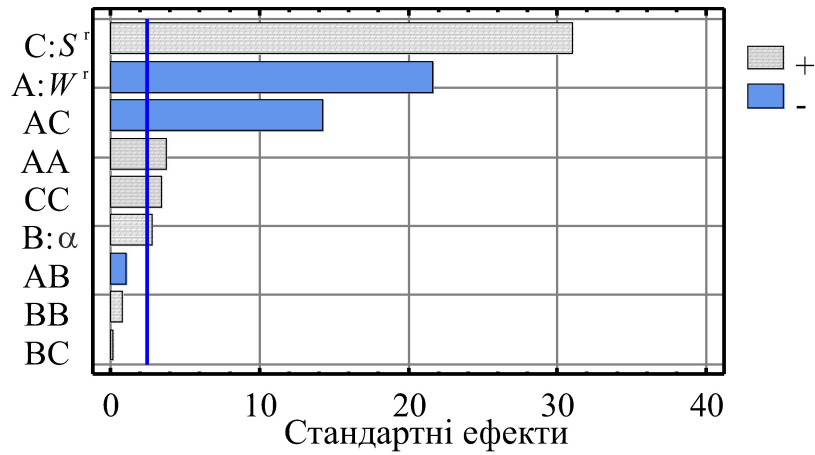
а)

Контурна поверхня

при $W^r = 17\%$



б)



в)

Рис. 3.4. - Багатофакторна регресія $\Delta G_k = f(\alpha, S^r, W^r)$:

а) $\Delta G_k = f(S^r, W^r)$ при $\alpha = \text{const}$;

б) $\Delta G_k = f(\alpha, S^r)$ при $W^r = \text{const}$;

в) діаграма Парето для ΔG_k

Результати експериментальних і розрахункових досліджень за даними рівнянь кінетики швидкості корозії за 100 і 1000 годин у вигляді залежностей $K=f(t_{\text{ст}})$ представлені на рис. 3.5 і рис. 3.6, відповідно із зазначенням допустимого рівня НТК протягом цього періоду часу, в який вкладається швидкість НТК при використанні тільки ВПЕ.

Змінний характер швидкості НТК пояснюється перехідним характером конденсації пари H_2SO_4 при $t_{\text{ст}}$ вище 140°C і конденсацією пари H_2O при $t_{\text{ст}}$ нижче 80°C при одночасному впливі туманоутворення пари H_2SO_4 внаслідок перенасичення пари H_2SO_4 при $t_{\text{ст}}$ в діапазоні $70\ldots 100^\circ\text{C}$ і дії адсорбційних процесів (хемосорбції і фізичної адсорбції). При $t_{\text{ст}}$ нижче 70°C зростання інтенсивності НТК зумовлене конденсацією пари H_2O , що зменшує концентрацію H_2SO_4 і збільшує швидкість НТК.

Отримані залежності показують, що при використанні палива з $W^r = 2\%$ збільшення α з 1,05 до 2,9 призводить до збільшення швидкості корозії в 2,2 рази (що відповідає даним рис. 3.3, а). При використанні ВПЕ з $W^r = 30\%$ при збільшенні α з 1,45 до 2,9 швидкість корозії зростає в 1,4 рази. Порівняння швидкостей НТК при $\alpha = 2,9$ показав, що при використанні ВПЕ з $W^r = 30\%$ при $t_{\text{ст}} = 110^\circ\text{C}$ (область «кислотного піка») швидкість НТК в 6,8 рази нижче, ніж при використанні рідкого палива з $W^r = 2\%$.

Протягом цього періоду часу в допустимому рівні НТК знаходиться вся конденсаційна поверхня нагріву в межах $t_{\text{ст}}$ від 140 до 70°C при використанні ВПЕ з $W^r = 30\%$, а також і при використанні палива з $W^r = 2\%$, але тільки при значенні α до 1,05. Це дозволяє знизити температуру відхідних газів з УК до $80\ldots 90^\circ\text{C}$.

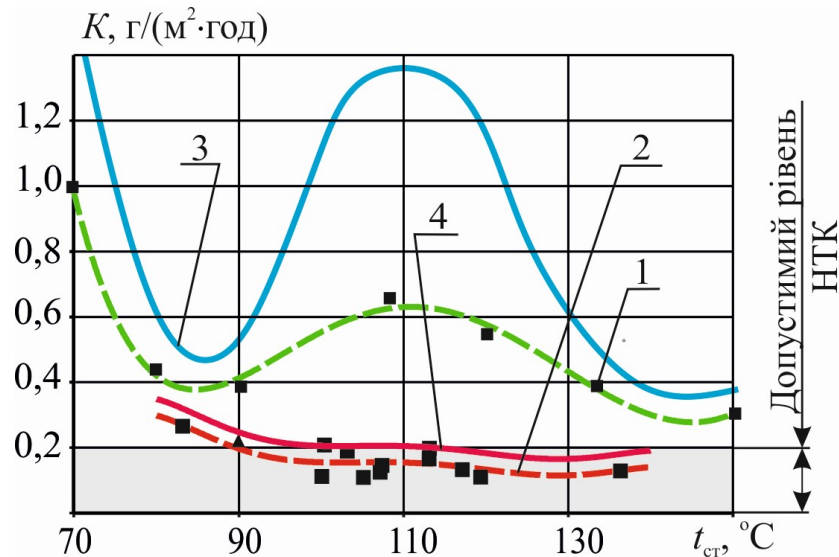


Рис. 3.5. Залежність швидкості корозії від температури стінки при використанні різних палив при $\tau = 100$ год:

- 1 – М100 ($S^r = 2,0 \%$; $W^r = 2,0 \%$) $\alpha = 1,05$;
- 2 – М100 ($S^r = 1,5 \%$; $W^r = 2,0 \%$) $\alpha = 2,9$, $\tau = 100$ год;
- 3 – ВПЕ М40 ($S^r = 1,8 \%$; $W^r = 30,0 \%$) $\alpha = 1,45$, $\tau = 88$ год;
- 4 – ВПЕ М40 ($S^r = 1,5 \%$; $W^r = 30,0 \%$) $\alpha = 2,9$, $\tau = 88$ год.

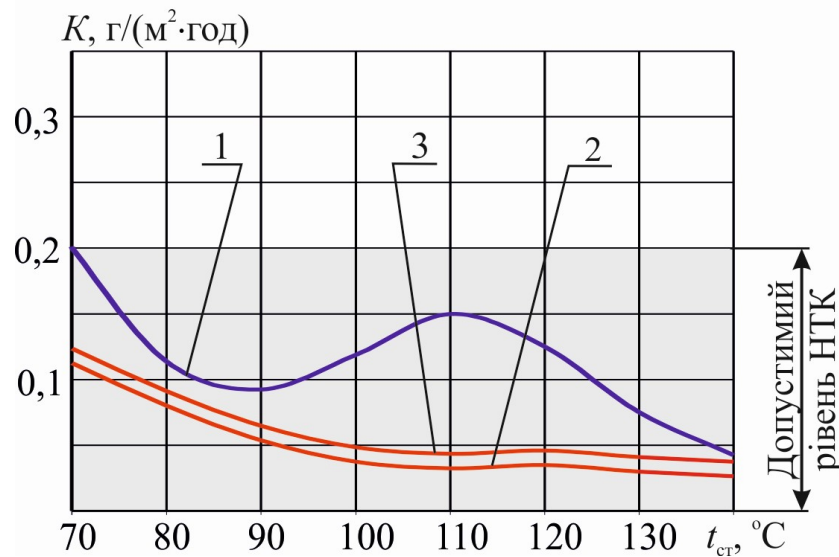


Рис. 3.6. Розрахункова залежність швидкості корозії від температури стінки при використанні різних палив ($\tau = 1000$ год):

- 1 – М100 ($S^r = 2,0 \%$; $W^r = 2,0 \%$) $\alpha = 1,05$;
- 2 – ВПЕ М40 ($S^r = 1,8 \%$; $W^r = 30,0 \%$) $\alpha = 1,45$;
- 3 – ВПЕ М40 ($S^r = 1,5 \%$; $W^r = 30,0 \%$) $\alpha = 2,9$.

3.3 Інтенсивність процесу забруднення низькотемпературних поверхонь нагріву

Забруднення на НТПН представляють собою суміш відкладень твердих часток золи і сажі, які осіли на поверхню з потоку газів, конденсату залишкової кислоти і продуктів корозії. Так як немає публікацій про конкретні значення швидкості забруднення поверхонь при підвищених α , то слід розглянути механізм впливу α на кількісні показники зазначених трьох компонентів, що визначають інтенсивність НТЗ.

При $W^r = 2\%$ зі збільшенням α до 1,4...1,6 швидкість НТК істотно зростає (в 2...3 рази в порівнянні з режимом $\alpha = 1,01$), а потім при подальшому зростанні α до 3,0 спостерігається незначне збільшення інтенсивності НТК (в $\sim 1,2$ рази) [35, 46]. Відповідно зміни швидкості корозії в забрудненнях збільшується вміст сульфатів. Це пояснюється зростанням масопотоків H_2SO_4 зі збільшенням значення α , інтенсивність якого в свою чергу визначається вмістом SO_3 в вихлопних газах (на рівні 0,5...0,8 Па), так як вміст водяної пари істотно вище (близько 10 кПа). При горінні сірчистих палив спочатку утворюється SO_2 , а потім в залежності від умов має місце доокиснення SO_2 в SO_3 надлишковим киснем.

Причому, залежність конверсії SO_2 в SO_3 від надлишку повітря має такий же вигляд, як і швидкості НТК від α . За численними даними істотне зростання вмісту SO_3 спостерігається при збільшенні α до $\sim 1,5$, а потім зростання концентрації SO_3 припиняється (за даними [33] вміст SO_3 не змінюється при збільшенні α вище 1,5). У зв'язку з викладеним та з урахуванням того факту, що на корозійний процес витрачається не весь масопоток кислоти внаслідок пасивації поверхні металу, вміст залишкової кислоти в складі забруднень при збільшенні α від 1,5 до 3,0 залишається постійним або навіть зменшується через невеликого зростання швидкості НТК (враховуючи, що швидкість НТК дещо відстає від значення масопотоків кислоти).

Кількість відкладень на поверхнях нагріву УК визначається вмістом твердих часток в потоці газів, що залежить від ефективності використання в них палива. Процесам горіння палива в ДВЗ і котлах і їх екологічним наслідкам приділяється велика увага. За численними опублікованими даними, наприклад, в двигунах [65] і в котлах [33, 141] зі збільшенням α до $\sim 1,5 \dots 2,0$ концентрація твердих часток різко знижується (в $2 \dots 3$ рази), а потім при подальшому зростанні α до $3,0$ концентрація твердих часток знижується тільки в $1,25$ рази. Кількість часток (відкладень), що осіли і закріпилися на НТПН, залежить від багатьох факторів (розміри і форма часток, аеродинамічні умови, адгезійні властивості плівки кислоти на поверхні осадження), але можна стверджувати, що кількість відкладень цих часток пропорційно їх концентрації в потоці газів.

Як показали проведені експериментальні дослідження при збільшенні водовмісту W^r ВПЕ до 30% насамперед різко знижується швидкість НТК (за даними [35, 8, 134] в 5 разів). У зв'язку з пасивацією поверхні металу оксидами азоту відповідно значно зменшується вміст сульфатів і відповідно збільшується вміст залишкової кислоти у складі забруднень [35, 8, 134, 46]. Завдяки мікрровибухам крапель ВПЕ і більш якісному процесу горіння в потоці газів концентрація сажових і коксових часток зменшується (при тому ж вмісті золи). Внаслідок значного зменшення розмірів твердих часток і впливу звукового поля, що генерується мікрровибухами (що погіршує умови закріплення часток на НТПН), кількість відкладень твердих часток зменшується в $4 \dots 5$ разів у порівнянні з режимом використання палив з $W^r = 2,0\%$ (в котлах підтверджується даними [35, 141] і зниженням димності потоку відхідних газів двигуна в ~ 2 рази [116]). Тому з урахуванням даних [116] при використанні малов'язких палив і ВПЕ на їх основі з збільшенням W^r до 30% прийняте зростання ΔG_3 пропорційно нижче даних при $W^r = 2,0\%$.

Так як основна маса забруднень (до $80 \dots 90\%$) утворюється при збільшенні α до $1,5$, тому важливо мати надійні дані про зростання кількості забруднень ΔG_3 при збільшенні α саме до $1,5$, так як потім із зростанням α від $1,5$ до $3,0$ ΔG_3 збільшується лише в $1,2 \dots 1,3$ рази.

З огляду на вплив на процес забруднення багатьох чинників, залежність ΔG_3 краще знаходити експериментальним шляхом.

Отримані за експериментальними даними апроксимаційні рівняння питомої маси забруднень ΔG_3 , а після їх диференціювання - швидкості забруднень K_3 , дозволять на підставі поданої фізико-хімічної і математичної моделей прогнозувати розвиток процесу забруднення при збільшенні α від 1,5 до 3.

Отримані експериментальні дані зі швидкості НТК і забруднення при значеннях $t_{\text{ст}}$ нижче температури точки роси пари кислоти на експериментальній установці (при значеннях α до 1,5) з урахуванням даних інших авторів [120, 128, 126] дозволили побудувати залежність $\Delta G_3 = f(\alpha)$, отримати її апроксимаційне рівняння (рис. 3,7, а, крива $W^r = 2 \%$), що визначає характер розвитку забруднення і підтверджує адекватність прийнятої моделі розвитку НТЗ із зростанням α . При використанні сірчистого мазуту М40 з $S^r = 1,5 \%$ і $W^r = 2 \%$ і ВПЕ з $W^r = 30 \%$ отримані експериментальні значення НТК і забруднення при зростанні α до 1,5, а потім з урахуванням розвитку процесу забруднення при використанні малов'язкого палива (крива $W^r = 2 \%$) за отриманим апроксимаційним рівнянням здійснений прогноз розвитку цих процесів до $\alpha = 3$ (рис. 3.7, а штрихові лінії). Отримані дані при значеннях α до 1,5 збігаються з даними інших авторів [8, 110], в яких, на жаль, відсутні відомості про НТК і забруднення при збільшенні α до 3.

Таким чином, отримані залежності інтенсивності забруднення $\Delta G_3 = f(\alpha)$ показують, що характер розвитку забруднення при використанні малов'язких і високов'язких сірчистих рідких палив з однаковим вмістом сірки зі збільшенням α збігається, хоча абсолютні значення приросту забруднень при використанні високов'язких мазутів істотно вище в зв'язку з великим вмістом золи і труднощів, пов'язаних із процесом їх спалювання [89].

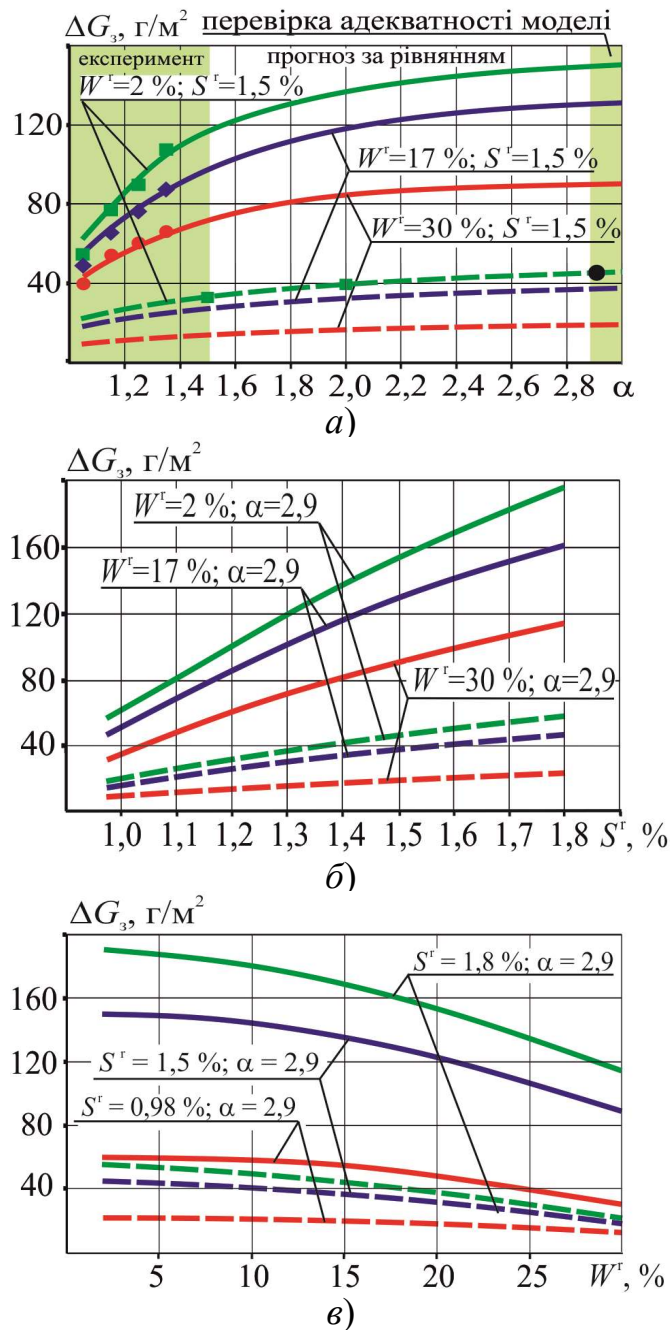


Рис. 3.7. Залежність питомої маси забруднення ΔG_3 в області кислотного піка ($t_{\text{ст}} = 110^\circ\text{C}$) при $\tau = 8$ год:

- а) $\Delta G_3 = f(\alpha)$ при $S^r = 1,5\%$ і $W^r = 2, 17$ і 30% ;
 $W^r = 2\%$: $\Delta G_3 = 31,245\alpha^3 - 20,6\alpha^2 + 553,09\alpha - 273,73$, $R^2 = 0,9999$;
 $W^r = 15\%$: $\Delta G_3 = 20,718\alpha^3 - 153,23\alpha^2 + 384,67,09\alpha - 202,16$, $R^2 = 0,9998$;
 $W^r = 30\%$: $\Delta G_3 = 13,266\alpha^3 - 95,69\alpha^2 + 236,23\alpha - 113,8$, $R^2 = 0,9999$;
б) $\Delta G_3 = f(S^r)$ при $\alpha = 2,9$ і $W^r = 2, 17$ і 30% ;
 $W^r = 2\%$: $\Delta G_3 = 211,209 \ln(S) + 65,827$, $R^2 = 0,9999$;
 $W^r = 15\%$: $\Delta G_3 = 172,903 \ln(S) + 60,586$, $R^2 = 0,9998$;
 $W^r = 30\%$: $\Delta G_3 = 132,617 \ln(S) + 36,652$, $R^2 = 0,9999$;
в) $\Delta G_3 = f(W^r)$ при $\alpha = 2,9$ і $S^r = 0,98, 1,5$ і $1,8\%$;
 $S^r = 1,8\%$: $\Delta G_3 = -0,055W^2 - 0,896W + 193,011$, $R^2 = 0,9998$;
 $S^r = 1,5\%$: $\Delta G_3 = -0,076W^2 - 0,171W + 149,962$, $R^2 = 0,9998$;
 $S^r = 0,98\%$: $\Delta G_3 = -0,049W^2 - 0,589W + 61,016$, $R^2 = 0,9999$.

Представлені на рис. 3.7, а залежності $\Delta G_3 = f(\alpha)$ при $S^r = 1,5\%$ показали збільшення ΔG_3 при зростанні коефіцієнта надлишку повітря α . При використанні палива з $W^r = 2\%$ при збільшенні α від 1,05 до 2,9 значення ΔG_3 зросли в 2,7 рази, при використанні ВПЕ з $W^r = 17\%$ - в 2,6 рази, з $W^r = 30\%$ - в 2,3 рази. При $\alpha = 2,9$ збільшення вмісту води в паливі з 2 до 30% призводить до зменшення ΔG_3 в 1,7 рази. При використанні ВПЕ з $W^r = 30\%$ на основі малов'язкого палива при тому ж значенні α інтенсивність забруднень ΔG_3 зменшилась в 2,3 рази.

На підставі отриманих експериментальних даних і апроксимаційних рівнянь з урахуванням залежностей $\Delta G_3 = f(\alpha)$ (рис. 3.7, а) отримані залежності питомої маси забруднень ΔG_3 від вмісту сірки S^r і води W^r (рис. 3.7, б, в).

Залежності, представлені на рис. 3.7, б (питомої маси забруднень) $\Delta G_3 = f(S^r)$ при однаковому значенні $\alpha = 2,9$ показали, що при використанні палива ($W^r = 2\%$) при збільшенні S^r з 0,98 до 1,8% ΔG_3 збільшилось в 3,1 рази. При використанні ВПЕ з $W^r = 17\%$ ΔG_3 збільшилось в 2,8 рази, при $W^r = 30\%$ - в 3,3 рази при тих же умовах.

На рис. 3.7, в представлені залежності $\Delta G_3 = f(W^r)$ при S^r , рівних 0,98, 1,5 і 1,8% при $\alpha = 2,9$. Отримані залежності показали, що зі збільшенням W^r в емульсії ΔG_3 знижується. При $S^r = 0,98\%$ при збільшенні вмісту води в паливі та ВПЕ від 2 до 30% ΔG_3 знижується в 1,8 рази, при $S^r = 1,8\%$ ΔG_3 знижується в 1,7 рази в тих же межах зміни W^r . Чим вищий вміст сірки в паливі, тим крутіше знижується крива залежності $\Delta G_3 = f(W^r)$.

Статистична обробка даних дозволила отримати рівняння, що враховує вплив на величину ΔG_3 коефіцієнта надлишку повітря α , вміст сірки S^r в паливі та води W^r в ВПЕ у вигляді:

$$\Delta G_3 = 119,896 + 2,0218W^r - 168,875\alpha + 198,06S^r - 0,0687(W^r)^2 + \\ + 0,2881W^r\alpha - 1,7212W^rS^r + 26,313\alpha^2 + 14,3069\alpha S^r - 29,7926(S^r)^2.$$

На величину ΔG_3 насамперед впливає вміст сірки S^r і води W^r в ВПЕ, а потім надлишок повітря α (рис. 3.8).

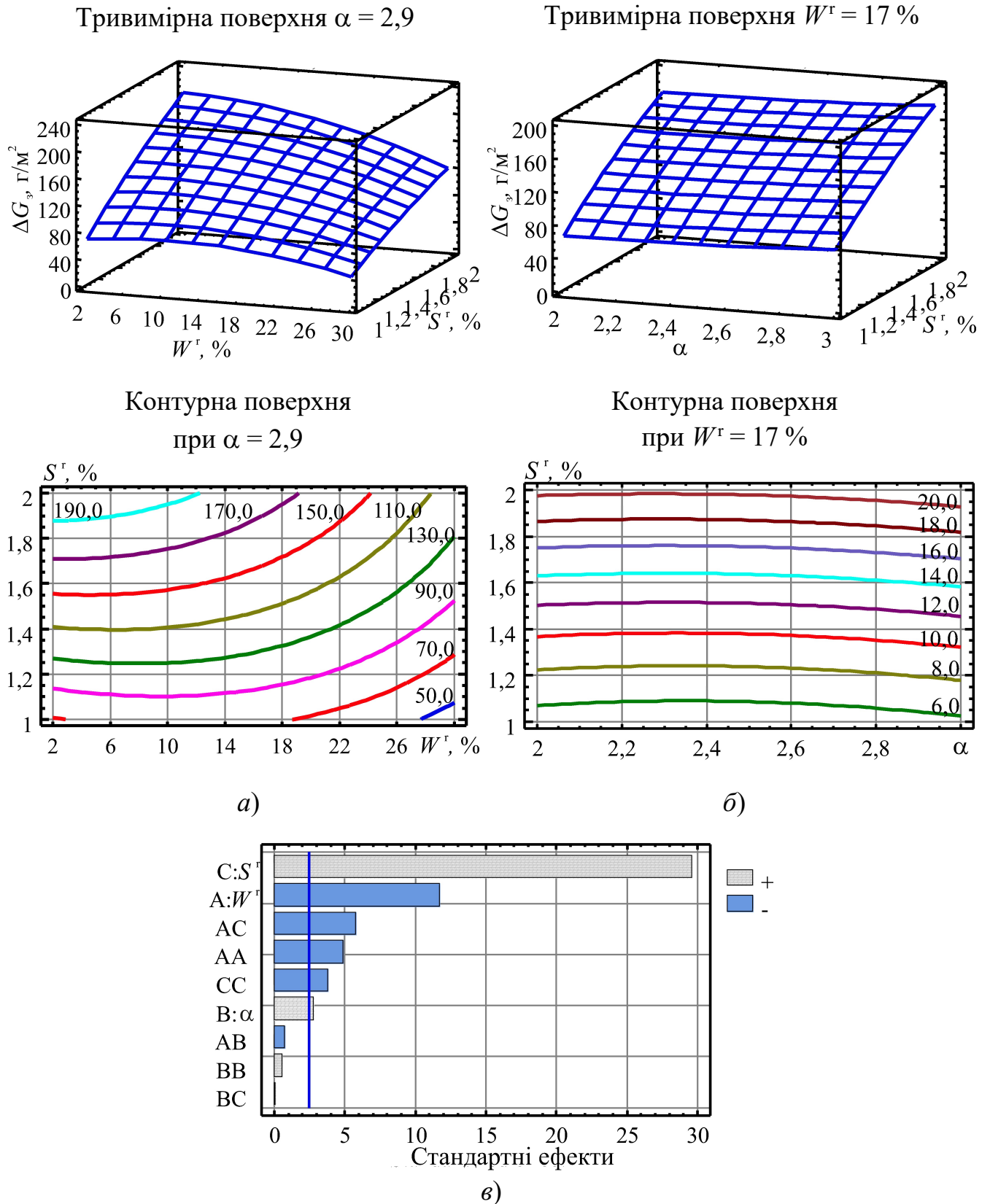


Рис. 3.8. - Багатофакторна регресія $\Delta G_3 = f(\alpha, S^r, W^r)$:

а) $\Delta G_3 = f(S^r, W^r)$ при $\alpha = \text{const}$;

б) $\Delta G_3 = f(\alpha, S^r)$ при $W^r = \text{const}$;

в) діаграма Парето для ΔG_3

Для оцінки ступеня забруднення НТПН при $t_{\text{ст}}$ нижче при розрахунках конвективного теплообміну необхідні дані про розвиток забруднення (рис. 3.9) протягом певного часу впливу потоку газів. Тому були проведені експериментальні дослідження кінетики розвитку забруднення. Стабілізація питомої маси забруднення ΔG_3 і швидкості забруднень K_3 спостерігається при τ вище 8 годин. Важливо, що за даними [33] стабілізація змісту SO_3 , що визначає швидкість НТК і забруднення, також має місце близько 8 годин. На підставі цих даних отримані апроксимаційні рівняння, що дозволяють прогнозувати швидкість забруднень на будь-який час дії потоку газів і надають можливість порівнювати отримані результати з даними інших авторів.

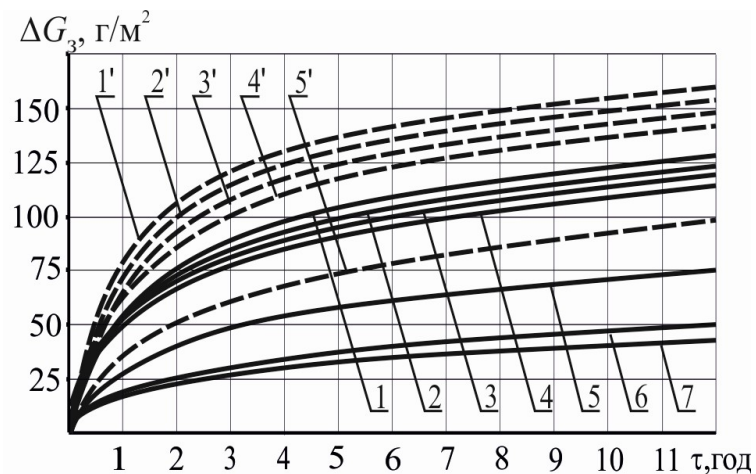


Рис. 3.9. Залежність питомої маси забруднень ΔG_3 від τ при $S^r = 1,5\%$:

1 – М40 ($W^r = 2,0\%$); 2 – М40 ($W^r = 10,0\%$); 3 – М40 ($W^r = 15\%$); 4 – М40 ($W^r = 17\%$); 5 – ВПЕ М40 ($W^r = 30,0\%$); 6 – (ДЛ+ДП) ($W^r = 2,0\%$) $\alpha = 2,9$; 7 – Ф-5 ($W^r = 2,0\%$) $\alpha = 2,0$; (— — — — — режими при $\alpha = 1,5$; - - - - - при $\alpha = 2,9$).

На основі проведених досліджень, даних кінетики розвитку забруднення, диференціювання отриманих апроксимаційних рівнянь на рис. 3.10 представлені залежності швидкості НТЗ при $\tau = 8$ годин і $\tau = 1000$ годин.

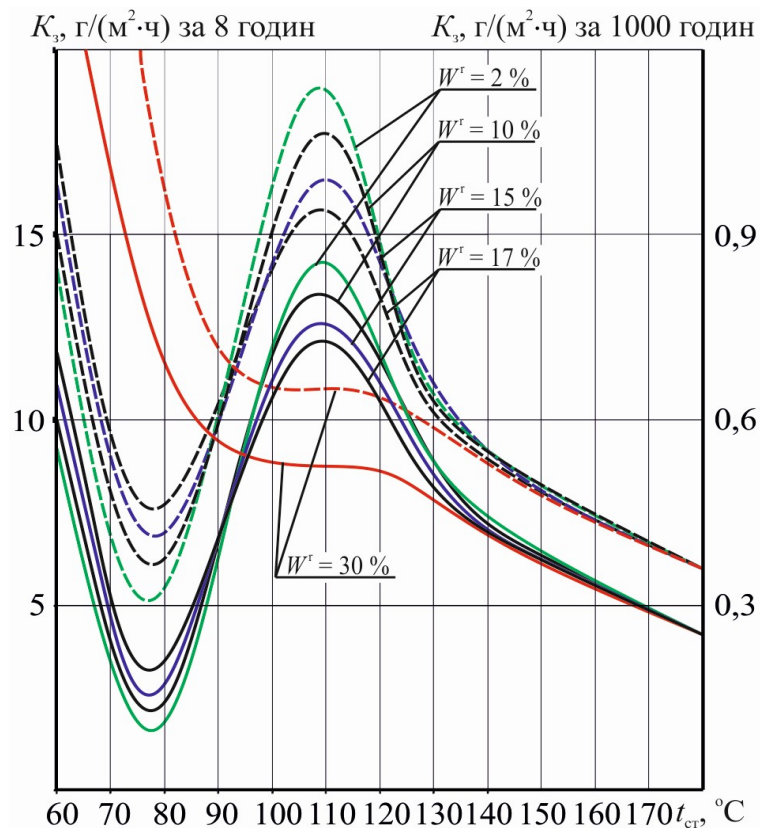


Рис. 3.10. Залежність $K_z = f(t_{ct})$ при $\tau = 8$ год і $\tau = 1000$ год (характеристики режимів – див. рис. 3.9).

Отримані залежності показують, що при збільшенні водовмісту ВПЕ швидкість забруднення K_z зменшується з $18,8 \text{ г}/(\text{м}^2 \cdot \text{год})$ при $W^r = 2 \%$ до $10,9 \text{ г}/(\text{м}^2 \cdot \text{год})$ при $W^r = 30 \%$. При використанні ВПЕ з $W^r = 30 \%$ при $t_{ct} = 110 \text{ }^\circ\text{C}$ «кислотний пік» забруднення відсутній.

Коефіцієнти детермінації представлених всіх залежностей знаходяться на рівні $0,96 \dots 0,99$.

За даними [119] в міру наростання відкладень на НТПН з t_{ct} нижче температури точки роси пари H_2SO_4 через приблизно 85 годин товщина шару досягає 4 мм і стабілізується, так як на поверхні шару відкладень температура стає рівною і вище температури точки роси пари H_2SO_4 .

Висновки по розділу 3

1. Отримані апроксимаційні залежності кінетики НТК і забруднення низькотемпературних поверхонь нагріву. Достовірність цих рівнянь підтверджуються результатами корозійних дослідженнях тривалих експериментів ($\tau = 1000$ годин).

3. Збільшення водовмісту W^r від 2 до 30 % (завдяки процесу пасивації внаслідок абсорбції оксидів азоту) при температурах стінки 110°C призводить до зниження швидкості НТК в 1,7...2,6 рази при вмісті сірки в паливі 0,98...1,8 % при $\alpha = 2,9$.

4. Статистична обробка результатів досліджень показує, що на інтенсивність НТК переважний вплив має вміст сірки і води в ВПЕ, а потім коефіцієнт надлишку повітря.

5. При використанні рідкого палива з $W^r = 2$ % швидкість НТК в 6,8 рази вище, ніж при використанні ВПЕ з $W^r = 30$ %.

6. За 100 годин в допустимий рівень НТК (0,25 мм/рік) укладається швидкість НТК тільки при використанні ВПЕ з $W^r = 30$ %. За 1000 годин в допустимому рівні НТК знаходиться вся конденсаційна поверхню нагріву в межах $t_{\text{ст}}$ від 140 до 70°C при $W^r = 30$ %, і при $W^r = 2$ % тільки при значенні α до 1,05.

7. Збільшення водовмісту ВПЕ від 2 до 30 % при температурах стінки в області «кислотного піка» ($t_{\text{ст}} = 100...110^\circ\text{C}$) призводить до зниження інтенсивності забруднення в 1,8...1,7 рази при вмісті сірки в паливі 0,98...1,8 % при $\alpha = 2,9$.

8. При використанні мазуту М40 питома маса забруднень ΔG_3 в 3,8 рази вище, ніж при використанні (ДП + ДЛ).

9. Статистична обробка результатів досліджень підтверджує достовірність отриманих даних. На інтенсивність забруднення насамперед впливає вміст сірки і води в ВПЕ, а потім α .

10. Прийнята методика визначення залежностей питомої втрати маси металу і питомої маси забруднень ΔG_z шляхом побудови рівнянь, отриманих при значеннях α до 1,5, коректна і забезпечує отримання достовірних даних і при великих α (до 3,0), які слід використовувати при проектуванні УК.

Результати досліджень в розділі з даної дисертаційної роботи знайшли своє відображення в наступних публікаціях автора [42, 45, 46, 49, 92, 94, 89, 90, 134, 121].

РОЗДІЛ 4

ОСОБЛИВОСТІ ТЕПЛОПЕРЕДАЧІ ПРИ ВИКОРИСТАННІ ВОДОПАЛИВНИХ ЕМУЛЬСІЙ

4.1 Еквівалентна теплопровідність в шарі забруднень

На думку [108] існують теоретичні залежності, які дозволяють з більшою або меншою точністю розрахувати ефективну теплопровідність пористих гетерогенних систем, але все ще відсутні досить надійні співвідношення, які були б загальноприйнятими для розрахунку ефективної теплопровідності капілярно-пористих і дисперсних систем певних класів матеріалів. При цьому не розглядається вплив змінного звукового тиску на пористість шару, що складається з окремих часток. Використання принципу узагальненої теплопровідності виявляється найбільш ефективним, якщо воно супроводжується розглядом структури матеріалу, оцінкою пористості системи, розмірів часток і пор, способів контактування часток між собою, оцінкою впливу кондуктивної, конвективної і радіаційної складових на ефективну теплопровідність системи. Тому ефективна теплопровідність такої системи є найскладнішою функцією температури, тиску газу, хімічного складу матеріалу і газу, пористості, розмірів і форми часток і пор.

За даними [108] диференціальні рівняння переносу теплоти в конденсаті і з пористістю Π в шарі мають вигляд:

$$\begin{aligned}\lambda_f \frac{d^2 T}{dx^2} - c_{pf} \rho_f v \frac{dT}{dx} &= 0 \quad (-\infty < x < 0); \\ \lambda_t (1 - \Pi) \frac{d^2 T}{dx^2} - c_{pf} \rho_f v \frac{dT}{dx} &= 0 \quad (0 < x < L),\end{aligned}\tag{4.1}$$

де c_{pf} – ізобарна питома теплоємність рідини.

Для пористих зольних і коксових шарів при проходженні через них конденсату передачею теплоти теплопровідністю через пори, що заповнені

рідиною, нехтувати не можна. Тоді замість виразу $\lambda_T(1 - \Pi)$ необхідно ввести коефіцієнт еквівалентної теплопровідності $\lambda_{\text{екв}}$, що дорівнює $\lambda_T + \Pi(\lambda_f - \lambda_T)$.

Оскільки в роботі поставлена мета визначення значень термічного опору шару забруднень (коефіцієнта забруднення ε_3) конденсаційних НТПН, що дорівнює відношенню товщини шару забруднень δ_3 до значення ефективного коефіцієнта теплопровідності $\lambda_{\text{екв}}$, то необхідно достовірно оцінити пористість шару.

4.1.1 Пористість шару забруднень

Товщина шару забруднень визначається перш за все кількістю відкладень твердих часток, що формуються у вигляді довільних засипок. Для визначення товщини шару, коли за експериментальними даними знайдені їх маса на 1 м^2 необхідно визначити насипну густину відкладень, яка в свою чергу залежить від пористості відкладень, яку необхідно оцінити.

У вигляді найпростішої моделі пористого тіла в [108] приймається система з сферичних часток досить малого радіуса і однакового розміру. Пористість такого середовища залежить від кута і укладання, а не від радіуса часток. При кубічному укладанні $\Pi = 47,64 \%$, а при гексагональному - $25,95 \%$.

Пористість з однакових куль не повинна залежати від радіуса куль. Однак для природних сипучих матеріалів, наприклад, піску, форма часток якого різна, пористість збільшується при зменшенні розміру зерен [108]. Так як при використанні ВПЕ внаслідок мікровибухів її крапель утворюються тверді частки довільної форми (частини сфери), а розміри часток золи і коксу істотно зменшуються, то можливе збільшення пористості вище 50% .

Отже, при наявності експериментальних даних з інтенсивності процесів забруднення НТПН надається можливість визначити вплив розглянутих факторів і їх комбінацій на значення коефіцієнта забруднення ε_3 спочатку при використанні рідких палив, тому що для їх умов опубліковано достатня кількість даних [30, 103, 142], а в нормативному методі розрахунку котлів [136] і [142] рекомендуються необхідні для проектування значення. Оскільки нашим

завданням є знаходження значень $\lambda_{\text{екв}}$ при використанні мазуту і ВПЕ на його основі, а потім зіставлення значень $\lambda_{\text{екв}}$ і далі ϵ_3 з відомими значеннями, то якщо одна з формул дозволить отримати ϵ_3 , близьку до рекомендованих [136, 142] або отриманим експериментальним значенням для використання мазуту з $W^r = 2\%$, то тоді отримане (з урахуванням розглянутих явищ в пористому шарі під впливом звукового поля при використанні ВПЕ) значення $\lambda_{\text{екв}}$ і ϵ_3 при $W^r = 30\%$ слід вважати достовірними.

В роботі [112] характеристики пористого шару досліджуються методом прямого числового моделювання. При цьому розглянуті варіанти упорядкованих засипок різної структури зі сфер постійного діаметра, а також варіант вільно насипаних шарів зі сфер або їх частин з заданою функцією розподілу за діаметрами.

Приклади сформованих з сфер засипок показані на рис. 4.1.

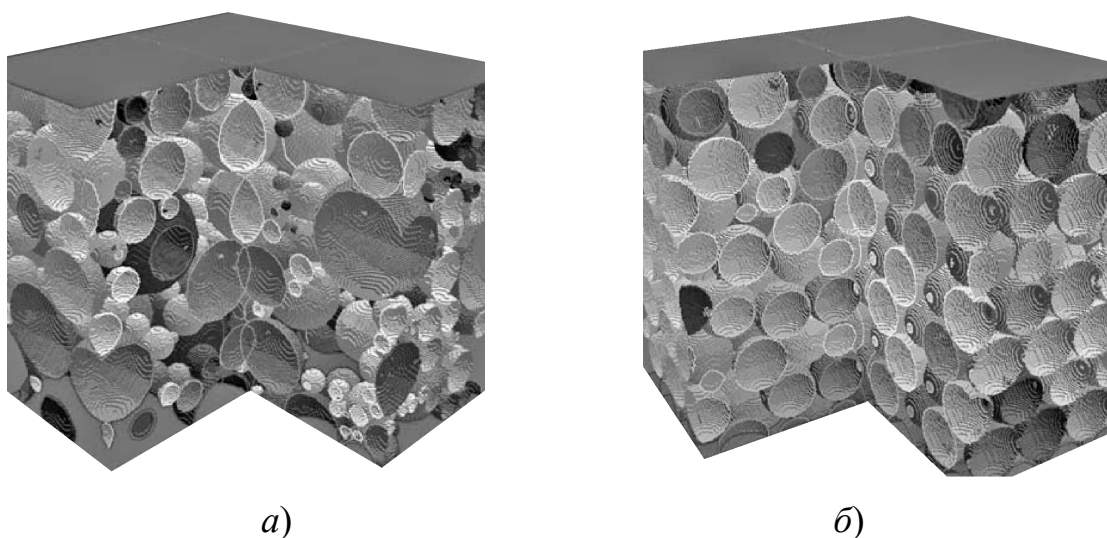


Рис. 4.1. Модельні контейнери засипок зі сфер: а) різного діаметра з пористістю $\Pi = 0,54$; б) однакового діаметра з пористістю $\Pi = 0,38$

Більш високе для вільно насипаного шару значення пористості отримують шляхом моделювання за допомогою «випадкового вилучення» деяких часток з об'єму модельного контейнера, що відповідає випадку відриву окремих часток або частини шару під впливом звукового тиску при використанні ВПЕ. На рис. 4.2 показані фрагменти упорядкованих засипок, для

яких в [112] були виконані розрахунки гідравлічного опору при русі фільтрату в діапазоні чисел Рейнольдса $10^{-3} < Re < 40$. Необхідно відзначити, що фрагменти прийнятих упорядкованих засипок при прийнятих вирізках, представлених на рис. 4.2, відповідають реальним уламкам (фрагментам) зольних часток після мікрровибухів крапель при горінні ВПЕ.

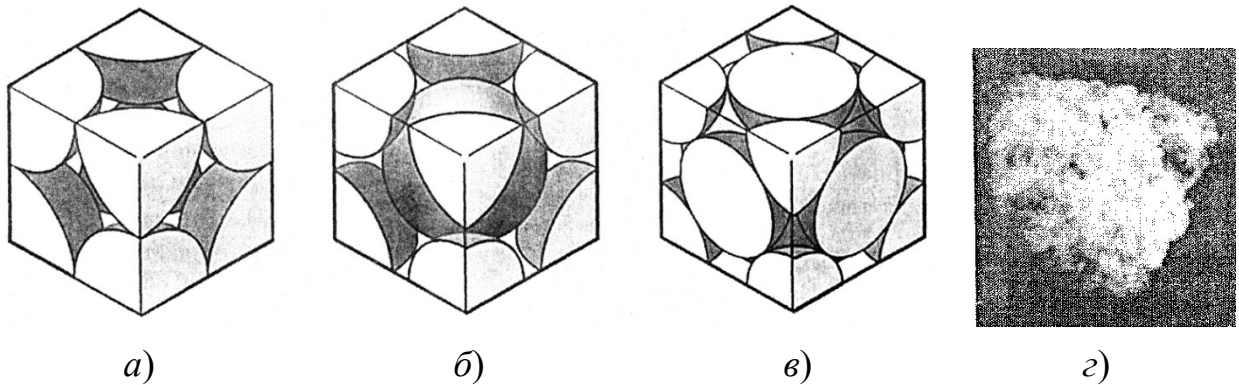


Рис. 4.2. Фрагменти упорядкованих засипок:

а) проста кубічна решітка $\Pi = 0,467$; б) об'ємно-центрована кубічна решітка $\Pi = 0,32$; в) гранецентрована кубічна решітка, $\Pi = 0,26$; г) фрагмент твердої частки при використанні ВПЕ

В роботі [112] представлено вигляд полів (рис. 4.3) продольної компоненти швидкості при проходженні теплоносія через шар таких упорядкованих засипок, які аналогічні стану поверхні конденсата на поверхні внаслідок інтерференції під впливом звукового поля.

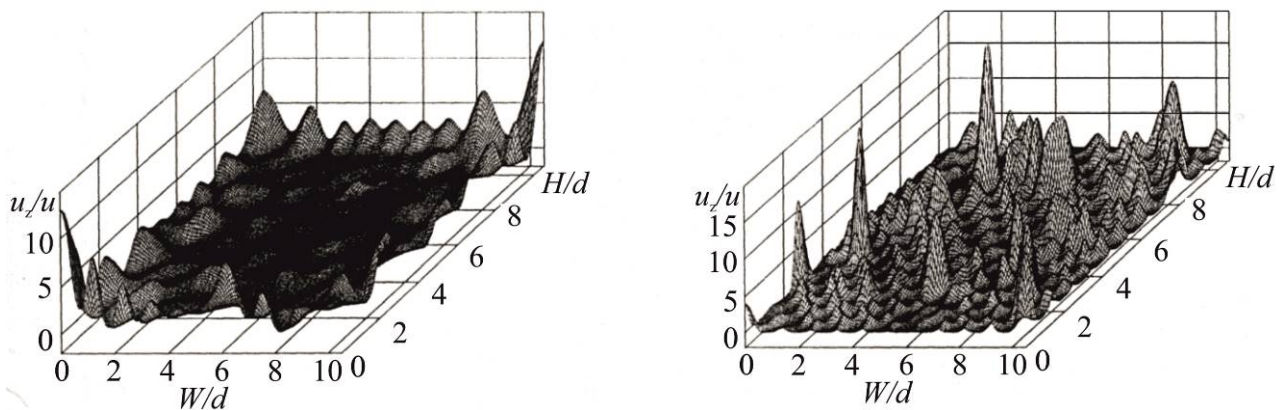


Рис. 4.3. Поле продольної компоненти швидкості при різних межах модельного контейнера

За даними [112] пористість вільно насипаних часток в залежності від обраних меж і розмірів розрахункових сіток контрольних обсягів з урахуванням розмірів часток може змінюватися в межах від 0,26 і до 0,534 при «вилученні» частини часток із фрагмента. Причому, судячи за видами засипки (рис. 4.1) менше значення пористості Π виходить при однакових розмірах часток. Але при розробці цієї моделі засипок не враховується вплив коливань часток під впливом змінного звукового тиску, що змінює значення пористості від ~ 1 на поверхні шару до 0,2 на поверхні стінки труби, де розташована щільна плівка сульфатів при використанні ВПЕ. При використанні сірчастого мазуту шар сульфатів більш розповсюджений по всій товщині забруднень, що зменшує його пористість (рис. 4.4).

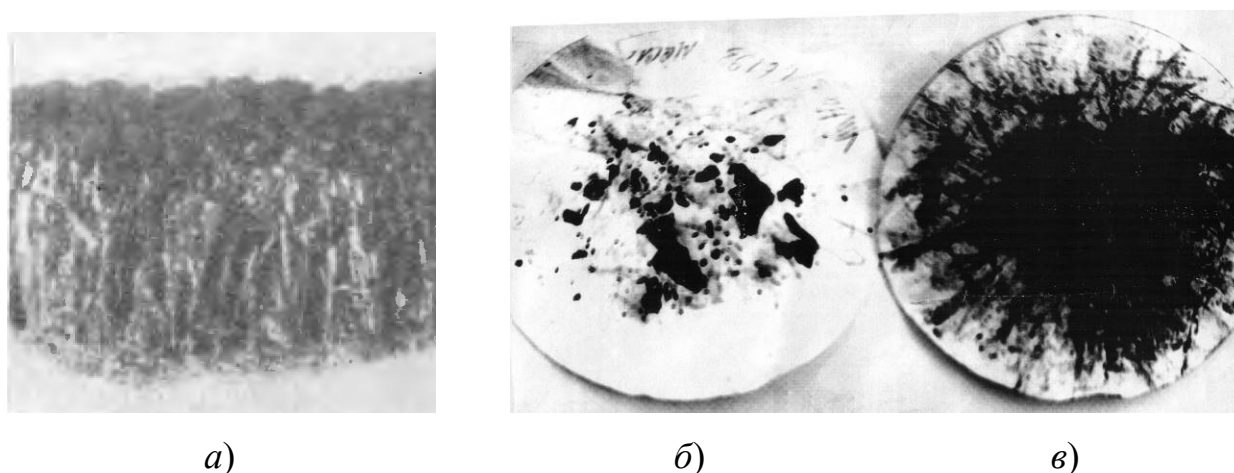


Рис. 4.4. Мікроструктура відкладень: а) золи на трубі котла $\delta_z = 6$ мм; б) на фільтрі зі зразків при використанні обводненого мазуту (фрагменти плівки сульфатів із саженою і золою); в) необводненого мазуту (розсип відкладень)

За даними [108] найпростішою моделлю капілярно-пористого тіла є система циліндричних капілярних трубок, пов'язаних між собою. При використанні ВПЕ внаслідок впливу звукових хвиль частка в шарі відкладень укладаються у вигляді шкаралуп півкуль і куль, які при цьому ще постійно розгойдуються. Тому в цьому випадку вигляд каналів у пористому тілі зводиться до еквівалентного капіляру конічної або щілеподібної форми, що орієнтуються перпендикулярно до поверхні нагріву. Тому значення Π на

поверхні шару відкладень дорівнює 1, а біля поверхні щільного шару сульфатів $\Pi = 0$. Середнє значення Π у цьому випадку дорівнює $\sim 0,5$.

Необхідно враховувати, що товщина шару забруднень δ_3 при наявності експериментальних даних про масу забруднень на 1 м^2 трубної поверхні при різних умовах залежить від значення насипної маси, яка в свою чергу також залежить від значення пористості. На підставі проведених розрахункових досліджень за прийнятою методикою з урахуванням статистичних даних [103], з урахуванням розглянутого механізму утворення шару при використанні мазуту і ВПЕ прийнято, що пористість шару при використанні мазуту ($W^r = 2 \%$) складає $\Pi = 0,3$; а при використанні ВПЕ ($W^r = 30 \%$) середнє значення пористості $\Pi = 0,48$. В цьому випадку отримані значення товщини забруднень δ_3 і коефіцієнтів забруднення ε_3 , відповідають статистичним даним [136, 142] для мазуту, і, отже, дає достовірні значення при використанні ВПЕ.

4.1.2 Визначення коефіцієнта еквівалентної теплопровідності

В якості найпростішої дисперсної системи визначення $\lambda_{\text{екв}}$ розглядається система, що складається з плоских шарів твердого скелета системи і рідини, що чергуються один з одним, де шари можуть бути розташовані як перпендикулярно напрямку теплового потоку, так і паралельно йому [108], що відповідає виду забруднень на поверхні труби (рис. 4.4) [33]. У першому випадку ефективна теплопровідність системи буде мінімальною і визначається виразом

$$\lambda_{\text{екв}}^{\text{мін}} = \frac{\lambda_{\text{д}} \lambda_{\text{б}}}{\Pi \lambda_{\text{д}} + (1 - \Pi) \lambda_{\text{б}}}, \quad (4.2)$$

де $\lambda_{\text{д}}$ – теплопровідність диспергованої фази;

$\lambda_{\text{б}}$ – теплопровідність безперервної фази;

Π – пористість.

У другому випадку ефективна теплопровідність системи буде максимальною

$$\lambda_{\text{екв}}^{\text{макс}} = \Pi\lambda_{\text{с}} + (1 - \Pi)\lambda_{\text{д}} \quad (4.3)$$

На думку [108] ці співвідношення через винятковість описуваних ними граничних випадків і ігнорування характеру контактів і структури можуть служити лише для позначення того діапазону, в якому лежать значення ефективної теплопровідності реальних дисперсних систем.

Одне з перших напрямків застосування принципу узагальненої провідності обґрунтував Максвелл [108]. Він розрахував електричне поле системи, що складається з ізотропного середовища, в яке вкраплені сторонні частки сферичної форми. Отримане Максвеллом співвідношення

$$\lambda_{\text{екв}} = \frac{\lambda_{\text{д}} + 2\lambda_{\text{с}} - 2(1 - \Pi)(\lambda_{\text{с}} - \lambda_{\text{д}})}{\lambda_{\text{д}} + 2\lambda_{\text{с}} + (1 - \Pi)(\lambda_{\text{с}} - \lambda_{\text{д}})} \lambda_{\text{с}} \quad (4.4)$$

використовується в тих випадках, коли пористість системи велика, так як Максвелл приймав, що відстань між частками велика в порівнянні з розмірами часток, що відповідає на нашу думку максимального значення $\lambda_{\text{екв}}$ при використанні ВПЕ. Пізніше теорію Максвелла поширили на еліпсоїдальні частки, а також, коли в дисперсному середовищі є кілька видів часток різної форми.

Рівняння типу рівнянь Максвелла дають результати, які зазвичай добре узгоджуються з експериментальними даними для пористих матеріалів [108], до яких можна віднести відкладення при використанні мазутів і ВПЕ з урахуванням умов, відповідних впливу режимів горіння і осадження часток. В [108] наведено висновок, що ця теорія дає хороші результати, якщо провідність часток менше провідності середовища, що характерно для забруднень і залишкової кислоти в них при використанні сірчистих палив.

Тому прийнято рішення для визначення значення $\lambda_{\text{екв}}$ використовувати формулу, прийняту в [54], в якій враховується пористість сульфатів, заповнених рідиною

$$\lambda_{\text{екв}} = \frac{2\lambda_{\text{д}} + \lambda_{\text{с}} - 2\Pi(\lambda_{\text{д}} - \lambda_{\text{с}})}{2\lambda_{\text{д}} + \lambda_{\text{с}} + \Pi(\lambda_{\text{д}} - \lambda_{\text{с}})} \lambda_{\text{д}} \quad (4.5)$$

Враховуючи різний стан забруднень (сухий при $t_{\text{ст}} > 140^\circ\text{C}$, парорідинний $t_{\text{ст}} = 140 \dots 120^\circ\text{C}$ і мокрий при $t_{\text{ст}} < 120^\circ\text{C}$) для визначення значень коефіцієнтів забруднення ε_3 конвективних НТПН необхідне знаходження коефіцієнтів еквівалентної теплопровідності $\lambda_{\text{екв}}$ для кожної зони температур стінки.

Були проведені розрахункові дослідження теплопровідності при різних варіантах станів забруднень на поверхні нагрівання з урахуванням прийнятої структури забруднень: 1) сухий шар відкладень на шарі сульфатів (простір між частками заповнений димовими газами) при $t_{\text{ст}}$ вище 180°C ; 2) шар відкладень з перегрітими парами кислоти при $140^\circ\text{C} \leq t_{\text{ст}} \leq 180^\circ\text{C}$; 3) шар відкладень з парокислотною сумішшю (конденсат і пари сірчаної кислоти); 4) шар відкладень, заповнений конденсатом сірчаної кислоти різної концентрації при $t_{\text{ст}}$ нижче 110°C ; 5) шар відкладень з конденсатом сірчаної кислоти меншою концентрації внаслідок абсорбції і конденсації пари H_2O при $t_{\text{ст}} < 70^\circ\text{C}$.

При визначенні $\lambda_{\text{екв}}$ для ділянки шару з парокислотною сумішшю необхідно враховувати ступінь сухості x цієї суміші в шарі, а також залежність концентрації H_2SO_4 від температури стінки [11]. При температурі стінки $t_{\text{ст}} = 140^\circ\text{C}$ ступінь сухості x приймалася рівною 1, при $t_{\text{ст}} = 110^\circ\text{C}$ рівною 0, а при $t_{\text{ст}} = 130^\circ\text{C}$ (кінець зони адсорбції) дорівнює 0,9. Значення $\lambda_{\text{екв}}$ для цього діапазону температур визначалося за формулою:

$$\lambda_{\text{екв}} = \lambda_{\text{к}} + (\lambda_{\text{п.к.}} - \lambda_{\text{к}}) \cdot x, \quad (4.6)$$

де $\lambda_{\text{к}}$ – теплопровідність кислоти, що залежить від $t_{\text{ст}}$, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$;

$\lambda_{\text{п.к.}}$ – теплопровідність пари сірчаної кислоти, що залежить від значення $t_{\text{ст}}$, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$;

x – ступінь сухості.

Значення коефіцієнтів теплопровідності конденсату сірчаної кислоти $\lambda_{\text{к}}$ і її пари $\lambda_{\text{п.к.}}$ приймалися за даними [11] в залежності від температури і концентрації кислоти.

В результаті проведених розрахункових досліджень отримані значення

еквівалентного коефіцієнта теплопровідності в залежності від $t_{\text{ст}}$ для варіантів стану шару відкладень при використанні рідких палив (мазуту і малов'язких палив ДП+ДЛ) при $W^r = 2 \%$ і ВПЕ на їх основі з $W^r = 17$ і 30% (рис. 4.5).

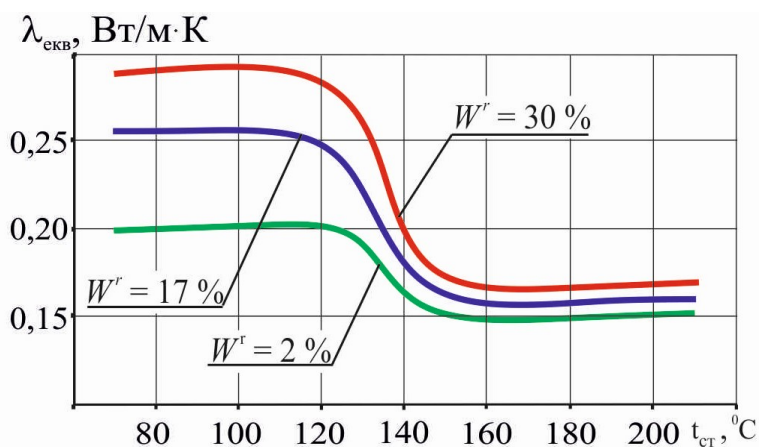


Рис. 4.5. Залежності еквівалентної теплопровідності шару забруднень $\lambda_{\text{екв}}$ від температури стінки $t_{\text{ст}}$ при використанні рідкого палива і ВПЕ:

Отримані залежності показують, що значення еквівалентного коефіцієнта теплопровідності забруднень залежить від пористості, форми і розмірів часток в шарі, складу і властивостей середовища, що заповнює порожнечі між частками, при відповідних температурах стінки. Зі збільшенням вологості відкладень в парокислотній зоні теплопровідність збільшується.

У вологому капілярно-пористому тілі разом з перенесенням енергії у вигляді теплоти відбувається перенесення енергії за рахунок масопереносу. При цьому необхідно врахувати наявність внутрішніх джерел теплоти, бо в шарі виділяється додаткова кількість теплоти внаслідок проходження абсорбційних процесів і проходження хімічних реакцій.

За прийнятим механізмом процесів при використанні ВПЕ з $W^r = 30 \%$ при температурах стінки нижче температури точки роси пари сірчаної кислоти крім процесу конденсації пари H_2SO_4 (за контактним механізмом) при наявності в потоці газів оксидів сірки SO_2 і SO_3 і еквімолярної суміші (або близькому значенні еквімолярної) оксидів азоту (NO і NO_2) відбувається цілий ряд хімічних реакцій утворення нітрозилсірчаної кислоти. Такий висновок

ґрунтується на тому, що рівень температур газів, поверхні металу і шару конденсату H_2SO_4 , концентрації H_2SO_4 в області НТПН котлів при $t_{\text{ст}}$ нижче $t_{\text{р H}_2\text{SO}_4}$ в потоці відхідних газів повністю відповідають технологічним умовам отримання сірчаної кислоти по нітрозному механізму сірчано-кислотного виробництва [11]. Отже, ці процеси приведуть до появи додаткової кількості H_2SO_4 за цим механізмом. Тому прийнято, що в шарі забруднень з конденсатом H_2SO_4 протікають хімічні реакції утворення нітрозилсірчаної кислоти, а також одночасно проходять процеси конденсації, абсорбції та розведення конденсату пари кислоти парою H_2O , які супроводжуються виділенням додаткової теплоти в шарі забруднень. При використанні сірчистих мазутів за даними [7] дійсна температура адсорбції пари H_2SO_4 при температурі шару забруднень близько 180°C (концентрація кислоти $\sim 92\%$ максимальна). В районі кислотного піка (температури стінки $100\dots 110^\circ\text{C}$) спостерігається зниження концентрації кислоти при використанні сірчастого мазуту до $72\dots 67\%$. При використанні ВПЕ з $W^r \approx 30\%$ в області кислотного піка при $t_{\text{ст}} = 100\dots 110^\circ\text{C}$ концентрація H_2SO_4 знаходиться на рівні 57% [35], при якій згідно з даними [11] спостерігається максимальна інтенсивність поглинання SO_2 , N_2O_3 з утворенням нітрозилсірчаної кислоти з подальшим виділенням сірчаної кислоти. При використанні ВПЕ з $W^r \approx 30\%$ термодинамічна точка роси водяної пари становить $t_{\text{р H}_2\text{O}} = 53^\circ\text{C}$. При $t_{\text{ст}}$ до $60\dots 70^\circ\text{C}$ внаслідок проходження процесів адсорбції пари H_2O пористим шаром забруднень спостерігається підвищення реальної температури точки роси водяної пари.

Тому сумарний тепловий потік через шар відкладень при використанні ВПЕ дорівнює

$$\vec{j}_e = -\lambda \nabla T + \sum_{i=1}^4 h_i \vec{j}_i, \quad (4.7)$$

де складова $\sum_{i=1}^4 h_i \vec{j}_i$ характеризує збільшення теплового потоку через шар забруднень при використанні ВПЕ.

Таким чином, в результаті проходження зазначених процесів виділяється

додаткова кількість теплоти. Як показали проведені розрахунки, проходження зазначених процесів в шарі забруднень створюється постійне джерело теплоти у шарі забруднення, що призводить до зміни механізму теплопровідності цього шару і зростання питомого теплового потоку на величину $q_{\Xi} = q_k(1 + \sum_{i=1}^n q_i)$, де $\sum_{i=1}^{10} q_i$ - сума додаткових теплових ефектів, яка становить близько 10 %.

4.2 Особливості конвективного теплообміну при використанні водопаливних емульсій

У наукових публікаціях представлено невелике число даних про якісні показники і практично відсутні і якісні, і кількісні дані про характер і показники проходження процесів теплообміну і забруднення НТПН конкретно при використанні ВПЕ, при якому генерується звукове поле з частотами в діапазоні 200...25000 Гц з інтенсивністю близько 100 дБ. Опублікована велика кількість даних про збільшення інтенсивності конвективного теплообміну під впливом вібрації і звукових коливань, що зосереджені в [18]. Тому на нашу думку, слід очікувати збільшення інтенсивності такого теплообміну і при використанні ВПЕ.

За даними [86] інтенсивність конвективного теплообміну при використанні ВПЕ при невеликих числах $Re = 800...2850$ пояснюється деформацією прикордонного ламінарного шару твердими частками. При цьому, на нашу думку, необхідно врахувати коливання і обертання часток поблизу поверхні перед осадженням під впливом звукового поля.

В [138] представлена функціональна залежність коефіцієнта посилення тепловіддачі з урахуванням впливу концентрації та розміру часток на характеристики турбулентності, тертя і параметрів газової і дисперсної фаз на теплообмін у вигляді формули відносини Nu запиленого потоку до Nu_0 чистого потоку:

$$\frac{Nu}{Nu_0} = 1 + C \left(\frac{r_q}{R} \right)^{-0,466} \cdot k_q^{0,607} \left(\frac{C_q}{C_g} \right)^{0,223}, \quad (4.8)$$

де Nu – критерій Нусельта запиленого потоку;

Nu_0 – критерій Нусельта чистого потоку;

$C = 2,73 \cdot 10^{-3}$ – допоміжний коефіцієнт;

r_q – радіус часток, м;

R – характерний розмір, м;

k_q – об'ємна концентрація часток;

C_q – теплоємність часток;

C_g – теплоємність газу.

Наведене співвідношення може бути використано при $\frac{r_q}{R} = (5 \dots 50) \cdot 10^{-5}$,

$$k_q = 0 \dots 0,42 \text{ і } \frac{C_q}{C_g} = 0,1 \dots 1,5.$$

Зі зменшенням радіусу часток r_q , зі збільшенням об'ємної концентрації часток k_q до 0,42 при радіусах часток в межах 5...10 мкм відношення Nu/Nu_0 досягає максимуму в межах 1,2...1,3.

Процес штучної турбулізації супроводжується незначною дисипацією енергії [18, 104]. Збільшення швидкості за рахунок коливань поверхні нагрівання і (або) потоку не супроводжується підвищенням гідравлічного опору. Згідно з опублікованими даними [19, 26, 104, 131] при пульсуючому горінні в самозбуджених системах коливання газового потоку досягаються без додаткових витрат на подолання гідравлічного опору.

Механізм інтенсифікації процесів теплообміну при впливі звукового поля складний і визначається сумарним впливом двох факторів: високочастотних збурюючих пульсацій звукового поля і акустичних течій біля поверхні, що виникають через присутність в ньому утворених стоячих хвиль [18, 104, 124].

Внаслідок створеного вихрового поля в прикордонному шарі пульсації акустичного поля впливають не тільки на інтенсифікацію тепловіддачі, а й на

зниження інтенсивності відкладень твердих часток з потоку газів [18, 79, 87, 103, 104].

На думку [18, 104] інтенсифікація теплообміну при омиванні пульсуючим потоком поверхонь нагріву відбувається внаслідок взаємодії пульсуючого профілю швидкостей і прикордонного шару біля поверхні нагріву. Опір пульсуючого шару, профіль швидкостей і прикордонний шар на стінках каналу визначають масообмін і теплообмін між потоком і стінкою. В цьому випадку результуюча швидкість пульсуючого потоку дорівнює

$$w_p = \overline{w} + w_s, \quad (4.9)$$

де w_p – результуюча швидкість пульсуючого потоку;

$\overline{w}$ – середня постійна швидкість потоку;

w_s – миттєва коливальна швидкість потоку.

За даними Г. Шліхтінга [149], профіль швидкостей пульсуючого потоку визначається градієнтом тиску $\delta p / \delta x$, який для синусоподібних коливань становить

$$\delta p / \delta x = \rho k \sin(\omega \tau), \quad (4.10)$$

де ρ – густина;

k – константа;

ω – кутова частота.

Змінний профіль швидкостей змушує коливатися і теплопідвід від потоку до стінки, що призводить до істотного збільшення середнього значення коефіцієнта тепловіддачі.

За даними [18, 104, 26] на теплопередачу при пульсаціях потоку впливає коефіцієнт пульсації

$$k = V' / \overline{w}, \quad (4.11)$$

де V' – максимальна амплітуда коливання швидкості.

При приведенні перебігу пульсуючого потоку до стаціонарного швидкість такого потоку дорівнюватиме:

$$w_p = \overline{w} + V' \cdot \sin \omega \tau \quad (4.12)$$

При цій швидкості за допомогою відомих рівнянь тепловіддачі і гідравлічних втрат надається можливість визначати середні розрахункові коефіцієнти тепловіддачі α_p і середні величини гідравлічного опору ζ при пульсаціях потоку. Однак порівняння розрахункових коефіцієнтів тепловіддачі з експериментальними величинами коефіцієнтів тепловіддачі показує, що експериментальні дані мають більш високі значення α_p . На думку [104] причина може полягати в нестабільності прикордонного шару внаслідок його періодичного відриву і поновлення, хоча дослідження Річардсона і Франке [104] з осцилюючими і пульсуючими потоками показали, що при пульсуючому потоці може і не відбуватися відрив прикордонного шару, причина може полягати в викривленні профілю швидкостей пульсуючого потоку поблизу стінки, пов'язаного з появою максимумів, що зростають зі збільшенням частоти коливань (аннуляр-ефект). Ця думка збігається з даними [18] та ін.

Вплив накладених на потік осцилюючих коливань і вплив аннуляр-ефекту розглядається і в інших роботах, наприклад, [6, 150].

Згідно з результатами експериментальних досліджень Є.Г. Річардсона і Е. Тайлера [150] при осцилюючому потоці в трубі відбувається викривлення епюри швидкостей (так званий аннулярний ефект Річардсона) (рис. 4.6).

Максимум усередненого в часі квадрата швидкості розміщується не на осі труби, а поблизу стінки (рис. 4.7) на відстані

$$\eta = y \sqrt{\frac{n}{2\nu}} = 2,28, \quad (4.13)$$

За даними [6] при стаціонарній моделі (рис. 4.8, а) відсутній вплив на прикордонний шар при частоті коливань до $\omega = 10$. При більш високих частотах від $\omega = 10$ і вище проявляється аннулярний ефект Річардсона, коли максимум середньоквадратичної швидкості зміщується від центру каналу (рис. 4.8, б). При подальшому зростанні частоти проявляється ефект подвійного аннулярного ефекту Річардсона, коли профіль швидкості має два максимуми (рис. 4.8, в).

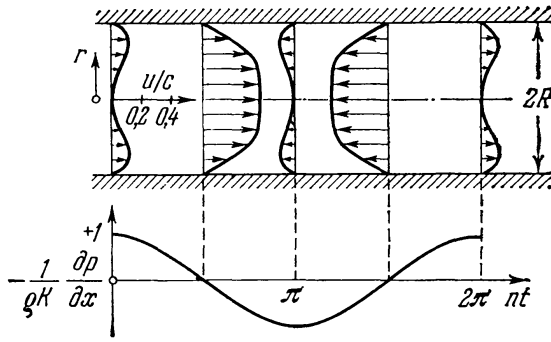


Рис. 4.6. Розподіл швидкостей при осцилюючій течії в трубі в різні часи

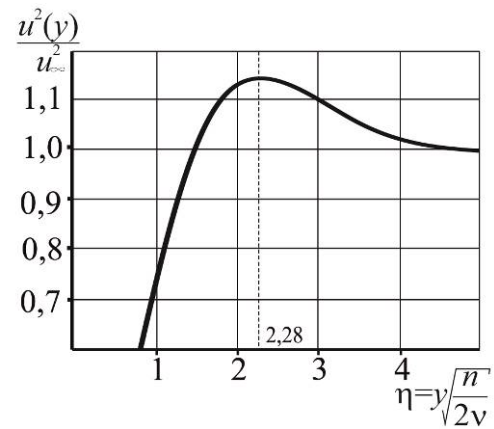


Рис. 4.7. Розподіл усередненого в квадрату швидкості при періодичній течії в трубі

Існуючі на сьогоднішній день експериментальні і теоретичні результати досліджень пульсуючих течій отримані, головним чином, для прикордонного шару і течії в гладкому каналі [20, 21, 31, 71, 98, 149].

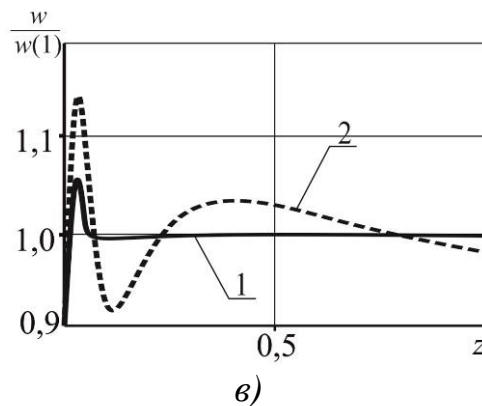
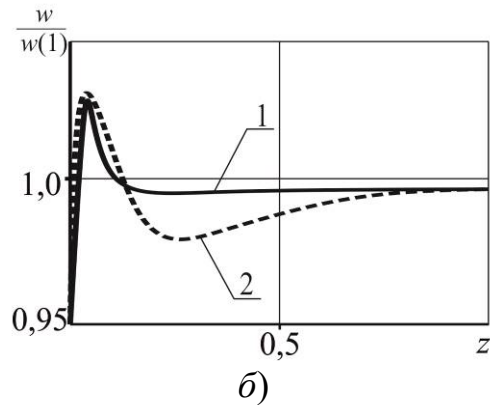
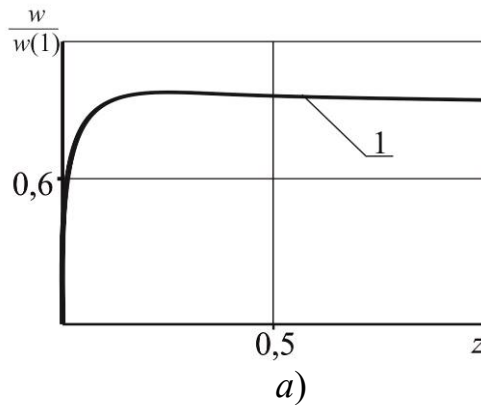


Рис. 4.8. Профілі швидкості при осциляційній течії в каналі: а – $\omega = 10$; б – $\omega = 100$; в – $\omega = 1000$; 1 – $s = 0$; 2 – $s = 0,97$

Результати експериментальних робіт [57, 59, 58, 60, 56, 113] також вказують на можливість інтенсифікації теплообміну за рахунок накладених пульсацій.

З урахуванням тимчасового і просторового розподілу швидкостей осцилюючого і пульсуючого потоків, а також виходячи з припущення виникнення пульсуючого прикордонного шару між стінкою труби і ядром потоку, що коливається, в [104, 149] отримано теоретичне співвідношення для чисел Nu_p при пульсуючому і осцилюючих режимах течії і $Nu_{\text{стац}}$ стаціонарного потоку, згідно з яким при створенні пульсуючого прикордонного шару зростання тепловіддачі залежить від критеріїв Pr і $Re_{\text{стац}}$, коефіцієнта пульсації k і $Re_p = f(w_p)$. Тепловіддача від пульсуючого потоку зростає зі збільшенням діаметра труби і коефіцієнта пульсації k , а також зі зниженням температури газового потоку і величини Re_p .

З'ясовано [18, 149], що при малих коливаннях середовища у поверхні вібруючого циліндра внаслідок тертя з'являється не тільки прикордонний шар, але і виникають додаткові (вторинні) течії на великій відстані від тіла, які не залежать від в'язкості, захоплюючи всю рідину і маючи сталий характер, хоча рух циліндра в рідині має суто періодичний характер (рис. 4.9). Необхідно звернути увагу на аналогічний розподіл течій в потоці під впливом ударної хвилі в потоці середовища з твердими частками пилу [132], що визначається впливом падаючих і відбитих часток в запиленому потоці димових газів (рис. 4.10).

Виникнення вторинних течій навколо циліндра, що розміщений в стоячу акустичну хвилю, розглянуто в роботах [138, 101, 99], в яких стверджується, що вторинні акустичні течії глибоко проникають в ламінарний прикордонний шар і інтенсифікують процес тепловіддачі.

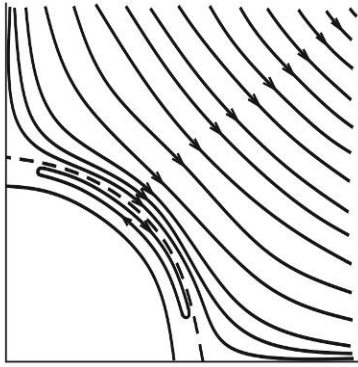


Рис. 4.9. Течія рідини біля вібруючого циліндра (при чистому падаючих і відбитих часток (при потоці теплоносія) [18]

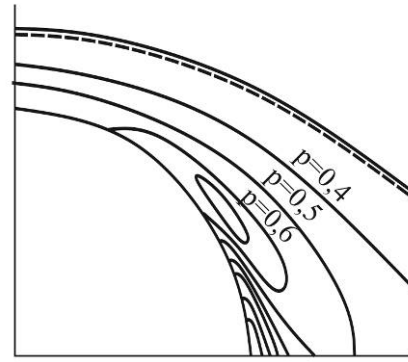


Рис. 4.10. Розподіл зон густини запиленому потоці теплоносія) [132]

За даними [99] (рис. 4.11) в результаті впливу плоскої набігаючої хвилі, що поперечно омиває нагрітий циліндр, в кожному квадраті генерується стаціонарні вторинні вихрові течії однакової інтенсивності: утворюються дві лобові лінії розділу замість однієї, яка спостерігається при звичайній моделі обтікання. Це призводить до скорочення довжини обтікання поверхні циліндра, внаслідок чого нарощування теплового ламинарного прикордонного шару буде меншим, і, отже, інтенсифікується тепловіддача.

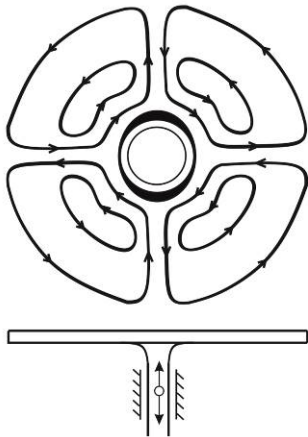


Рис. 4.11. Схема вторинних акустичних течій у стінки циліндра

Зі зростанням інтенсивності акустичних коливань спостерігається руйнування прикордонного шару, так як акустичні хвилі, що поширюються, являють собою організовані коливання мікрочасток теплоносія [100].

За даними [138] при наявності акустичних хвиль з інтенсивністю $0,16 \text{ Вт/см}^2$ і $\lambda_0 = 25 \text{ мм}$ тепловіддача циліндра в порівнянні зі звичайною вільною конвекцією зростає приблизно в 2 рази.

При проведенні досліджень тепловіддачі циліндра в полі акустичних коливань при вимушеній конвекції [101] з'ясувалося, що для отримання помітних змін в прикордонному шарі потрібна досить висока інтенсивність випромінюваних коливань. Зміни в прикордонному шарі значні, якщо середнє значення коливальної швидкості не менше поступальної швидкості потоку. В результаті обробки результатів дослідів автором [101] з рівняння руху отримано новий критерій механічного подібності

$$k_{\pi} = p/\rho w^2, \quad (4.14)$$

де p - тиск акустичного випромінювання;

w - швидкість примусового руху газового середовища.

Залежність впливу k_{π} на інтенсивність теплообміну (рис. 4.12) показує, що крива дає помітний перелом, коли середнє значення коливальної швидкості в акустичній хвилі наближається до значення поступальної швидкості (після перелому $Nu_p = 27 (k_{\pi}^{0,2})$).

З підвищенням швидкості вимушеної конвекції відбувається зменшення інтенсифікації теплообміну, тобто ефект озвучування проявляється слабше.

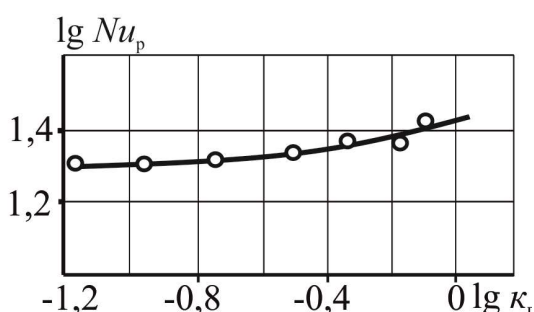


Рис. 4.12. Тепловіддача циліндра при примусовій конвекції і звукових коливаннях теплоносія

При дослідженнях теплообміну, проведених з трубами з резонансною системою в вимушеному потоці, під впливом зовнішніх коливань [100, 101] показали, що при невеликих швидкостях тепловіддача від стінки трубки до потоку зростала в 1,5...2,0 рази, при швидкості 23 м/с - на 20...25 % (рис. 4.13).

Необхідно відзначити, що збільшення інтенсивності тепловіддачі на рівні 20 % є цілком доцільним, особливо в тому випадку, коли коливання газового середовища генеруються мимовільно і автоматично супроводжують процес горіння палива (або ВПЕ) (і при цьому не збільшується аеродинамічний опір).

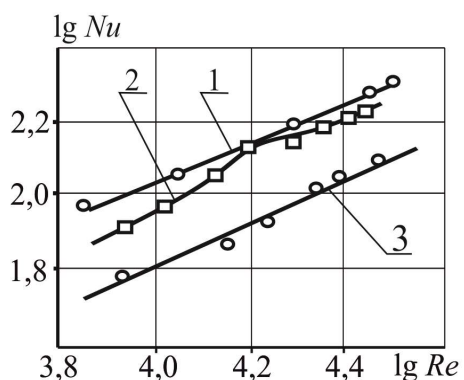


Рис. 4.13. Порівняння тепловіддачі гладкого циліндра і циліндра з резонаторами: 1 - трубка з порушеними резонаторами; 2 - трубка з непорушними резонаторами; 3 - гладка трубка

На думку [124] усереднення значень коливального числа Рейнольдса слід проводити не по усередненому значенню швидкості коливань, а за ефектом тепловіддачі. Тоді внаслідок виникнення вторинних течій біля поверхні труб ефективне число $Re_{\text{еф}}$ в 1,83 рази більше амплітудного звукового Re_A .

При конденсації пари конвективний теплообмін супроводжується масообміном (конденсацією з парогазової суміші), що за інших рівних умов збільшує коефіцієнт тепловіддачі в порівнянні з теплообміном сухого газу на величину $(1 + \phi_m)$, де ϕ_m безрозмірний параметр, що враховує тепловіддачу з перенесенням теплоти і маси (таким чином можна врахувати і вплив звукового поля) [140].

За даними [78, 105, 118, 129] при конденсації пари з парогазової суміші до значення коефіцієнта тепловіддачі α для сухих газів додається значення коефіцієнта масовіддачі при конденсації пари.

Таким чином, на підставі розглянутого впливу інтенсивності коливань звукового тиску на рівні 100 дБ при використанні ВПЕ при швидкостях газового потоку на рівні 25 м/с при розрахунках конвективних поверхонь нагріву котлів слід враховувати збільшення інтенсивності тепловіддачі від газів до поверхні в 1,5 рази.

Висновки по розділу 4

1. На основі проведених теоретичних досліджень визначена пористість забруднень на конденсаційних поверхнях при використанні мазутів і ВПЕ. Для мазутів вона складає 0,3, а для ВПЕ – 0,48.

2. Встановлено, що пористість забруднень на сухих поверхнях нагріву при використанні ВПЕ складає 0,9, при використанні мазуту – 0,7.

3. На основі проведених досліджень обрана формула для розрахунку еквівалентного коефіцієнта теплопровідності пористого шару забруднень.

4. Розрахункові дослідження залежностей $\lambda_{\text{екв}} = f(t_{\text{ст}})$ при різних водовмістах ВПЕ показують, що для визначення коефіцієнтів термічного опору шару забруднень необхідно враховувати 5 зон значень $\lambda_{\text{екв}}$.

5. Встановлено, що значення коефіцієнта еквівалентної теплопровідності забруднень залежить від пористості, складу і властивостей середовища, що заповнює порожнечі між частками, при відповідних температурах стінки.

6. Встановлено, внаслідок виділення теплоти в шарі відкладень (внутрішні джерела теплоти) при проходженні процесів абсорбції, конденсації, реакції створення нітрозілсірчаної кислоти значення теплового потоку збільшується на 10 %.

Результати досліджень в розділі з даної дисертаційної роботи знайшли своє відображення в наступних публікаціях автора [92, 93].

РОЗДІЛ 5

ВПЛИВ ЗАБРУДНЕННЯ ПОВЕРХОНЬ НАГРІВУ НА ІНТЕНСИВНІСТЬ ТЕПЛОПЕРЕДАЧІ В УТИЛІЗАЦІЙНИХ КОТЛАХ ПРИ ВИКОРИСТАННІ ВОДОПАЛИВНИХ ЕМУЛЬСІЙ

5.1 Визначення термічного опору шару забруднень на поверхнях нагріву

Інтенсивність теплопередачі суттєво залежить від термічного опору шару забруднень (коефіцієнт забруднення), який в нормативних документах [30, 103, 136, 142] позначається символом ε_3 і визначається по формулі $\varepsilon_3 = \delta_3 / \lambda_{\text{екв}}$, де δ_3 – товщина забруднень на конвективній поверхні.

5.1.1 Визначення товщини шару забруднень

Шар забруднень на конденсаційних поверхнях при використанні сірчистих мазутів і ВПЕ на їх основі (а також сірчистих малов'язких палив і ВПЕ на їх основі) визначається сумою товщин продуктів корозії (сульфатів) і шаром відкладень твердих часток (сажі, золи і коксу), які насичені конденсатом кислоти. При визначенні товщини шару забруднень δ_3 було прийнято припущення, що маса сульфатів створює суцільний щільний шар $\delta_{\text{сульф}}$ з реальною густиною ($\delta_{\text{сульф}} = 1,15 \cdot \Delta G_{\text{к}} / \rho_{\text{сульф}}$, значення $\Delta G_{\text{к}}$ знайдені експериментальним шляхом [46]). Інша маса забруднень – це пористий шар відкладень $\delta_{\text{від}}$ з насипною густиною твердих часток $\rho_{\text{н}}$, значення якої визначає величину товщини шару забруднення δ_3 , що дорівнює відношенню маси всіх відкладень ΔG_3 до $\rho_{\text{н}}$ ($\delta_3 = \Delta G_3 / \rho_{\text{н}}$). Значення маси забруднень ΔG_3 були знайдені експериментальним шляхом [89]. Тоді $\delta_3 = \delta_{\text{від}} + \delta_{\text{сульф}}$.

Насипна густина відкладень залежить від пористості шару з врахуванням геометричних параметрів системи і розподілу твердих часток в шарі, які осідають з потоку димових газів на корозійну поверхню нагрівання. На основі

проведених досліджень та літературних даних [46, 89, 112] прийнято, що при використанні сухого палива пористість Π забруднень на конденсаційних НТПН знаходиться на рівні 0,3 [112], а при використанні ВПЕ з $W^r = 30\%$ пористість збільшується до 0,48 внаслідок істотного зменшення розмірів часток, зміни їх форми (з'являються уламки сфер часток внаслідок мікрровибухів крапель ВПЕ) і впливу звукового поля, що призводить до зміни укладання часток в шарі [112].

На основі літературних даних [8, 30, 79, 103] для розрахунку значень насипної густини відкладень на сухих конвективних поверхнях були прийняті значення пористості: при використанні сірчистих мазутів з W^r до 2 % $\Pi = 0,7$, а при використанні ВПЕ – $\Pi = 0,9$.

Для визначення теплового опору шару забруднень за формулою $\varepsilon_3 = \delta_3 / \lambda_{\text{екв}}$ необхідно спочатку визначити залежність товщини забруднень $\delta_3 = f(\tau)$ від часу дії потоку газів. На рис. 5.1 представлені залежності $\delta_3 = f(\tau)$ при $t_{\text{ст}} = 110^\circ\text{C}$, при якій має місце "корозійний пік" і максимальне значення забруднення конденсаційних поверхонь при використанні сірчистих мазутів і ВПЕ на їх основі.

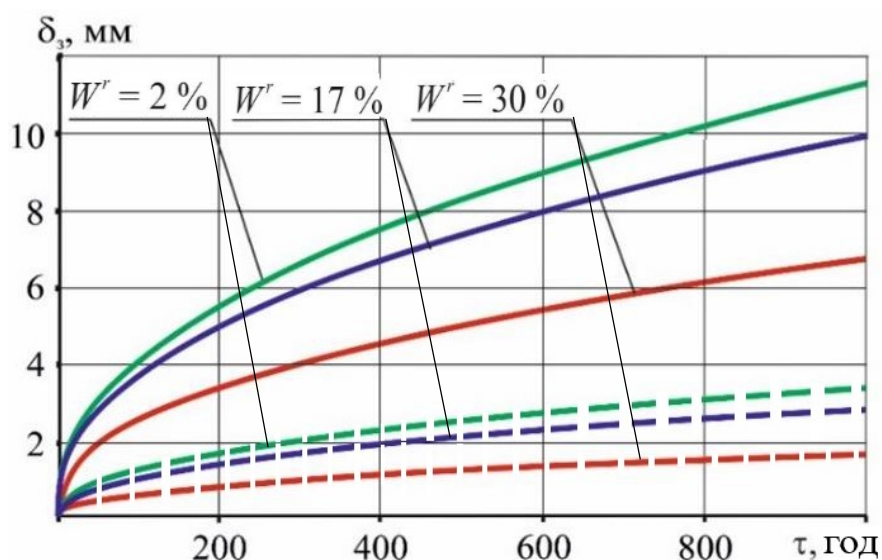


Рис. 5.1. Залежність товщини шару забруднень δ_3 від часу дії потоку газів τ при використанні: — — мазуту ($W^r = 2\%$, $S^r = 1,8\%$) ВПЕ на його основі ($W^r = 17\%$; $W^r = 30\%$); - - - - ДП+ДЛ ($W^r = 2\%$ $S^r = 0,98\%$); ВПЕ на його основі ($W^r = 17\%$; $W^r = 30\%$)

На основі прийнятих припущень і експериментальних даних кінетики забруднення при різних значеннях $t_{\text{ст}}$ при використанні мазуту і ВПЕ шляхом проведення розрахункових досліджень можливих (прогнозованих) товщин шару забруднення δ_3 були знайдені залежності $\delta_3 = f(t_{\text{ст}})$ (рис. 5.2) при часі впливу потоку відхідних газів $\tau = 1000$ годин.

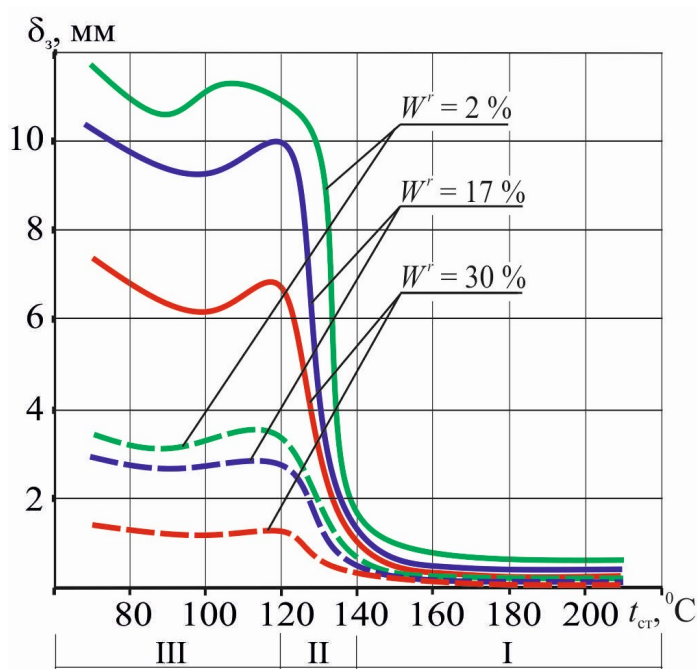


Рис. 5.2. Залежність товщини забруднень δ_3 від температури стінки $t_{\text{ст}}$ при використанні: (див. позначення рис. 5.1); I – суха зона; II – парокислотна зона; III – кислотна зона

Необхідно відзначити, що розрахункові значення середньої товщини шару забруднень δ_3 за насипною густиною для режиму використання мазуту з $W^r = 2\%$ відповідають опублікованим даним [30, 119, 103] при часі впливу потоку газів $\tau = 1000$ годин при використанні рідкого палива, що підтверджує правомірність прийнятої методики оцінки пористості і визначення δ_3 , які, крім того, були проконтрольовані шляхом прямих вимірювань товщин. Тому вважаємо, що достовірним є визначення товщини шару забруднень при тих же значеннях $t_{\text{ст}}$ при використанні ВПЕ, що розраховані за тією ж методикою при прийнятих припущеннях з урахуванням можливості прямого контролю

товщини забруднень.

Змінний характер залежності δ_3 від $t_{ст}$, обумовлений різним станом шару забруднень (від сухого до мокрого з проміжною ділянкою парокислотної суміші), вказує на необхідність визначення значень δ_3 для кожного відповідного діапазону значень $t_{ст}$ і вимагає відповідно проведення розрахунків конвективних поверхонь за зонами в залежності від значення $t_{ст}$. Зменшення δ_3 в діапазоні температур $t_{ст} = 105...80$ °C пов'язано з появою аерозолі H_2SO_4 , що зменшує інтенсивність конденсації пари кислоти.

5.2 Визначення коефіцієнтів забруднення

Отримані залежності середньої товщини шару забруднень δ_3 від температури стінки (рис. 5.2), а також значення коефіцієнта еквівалентної теплопровідності $\lambda_{екв}$ від стану забруднень, які також залежать від величини $t_{ст}$ (рис. 4.5), надали можливість побудувати залежності коефіцієнтів забруднення ε_3 від температури стінки $\varepsilon_3 = f(t_{ст})$ при $\tau = 1000$ годин (рис. 5.3), які показують, що при однакових температурах стінки $t_{ст}$ при використанні ВПЕ з $W^r = 30$ % на основі мазуту М40 значення коефіцієнтів забруднення ε_3 істотно нижчі, ніж при використанні мазуту з $W^r = 2$ %: в зоні мокрих забруднень - в 2,6 рази; в зоні сухих забруднень - в 2 рази. Таке ж співвідношення значень ε_3 за вказаними зонами отримані і при використанні малов'язких палив (ДП+ДЛ) і ВПЕ на їх основі, але абсолютні значення ε_3 істотно нижчі.

З урахуванням використаних параметрів пари і середовищ поверхонь нагріву УК на рис. 5.3 представлені значення ε_3 по зонах $t_{ст}$, що відповідають поверхням нагріву УК для парорідинної зони ($t_{ст} = 120...140$ °C), конденсаційної ($t_{ст}$ нижче 120 °C) і сухої ($t_{ст}$ вище 140 °C), які можна рекомендувати для проведення теплотехнічних розрахунків.

З метою перевірки адекватності (достовірності) отриманих результатів розрахунково-експериментальних досліджень здійснено порівняння отриманих

значень ε_3 з опублікованими статистичними даними [136, 142] при використанні рідких палив, а також даними [152], де представлені якісні характеристики забруднення при використанні ВПЕ (кількісні дані відсутні).

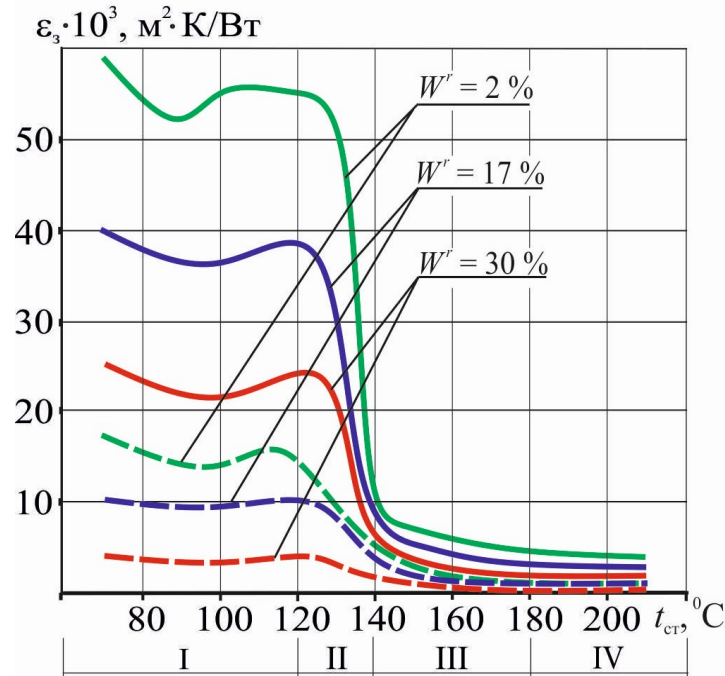


Рис. 5.3. Залежність коефіцієнта забруднення ε_3 від температури стінки $t_{ст}$ (за зонами поверхонь нагріву УК) при використанні: (позначення позицій див. рис. 5.1); I – конденсаційна поверхня підігрівача води або економайзера; II – економайзер; III – випарник; IV – пароперегрівник

Достовірність прийнятих припущень при визначенні рівня пористості шару забруднень і його $\lambda_{екв}$ при використанні рідких палив і ВПЕ на їх основі оцінювалася шляхом порівняння зі значеннями коефіцієнтів забруднення ε_3 для практично сухих поверхонь, що представлені в [142] і нормативних документах [136] (рис. 5.4). Порівняння даних по сухій зоні підтверджує достовірність проведених на експериментальній установці досліджень процесів забруднення при використанні палив з $W^r = 2\%$ і методики визначення пористості II і $\lambda_{екв}$, так як отримане значення ε_3 при швидкості газів 8 м/с знаходиться в зоні рекомендованих значень ([142] рис. 5.4, б) і $\varepsilon_3 = 0,005 \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт}$ [136]. При цьому необхідно відмітити, що при $t_{ст}$ вище 140 °С при швидкості газів вище

20 м/с при використанні ВПЕ поверхні нагріву практично чисті ($\varepsilon_3 \approx 0,001 \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт}$), що підтверджується даними експлуатації котлів при використанні ВПЕ [152].

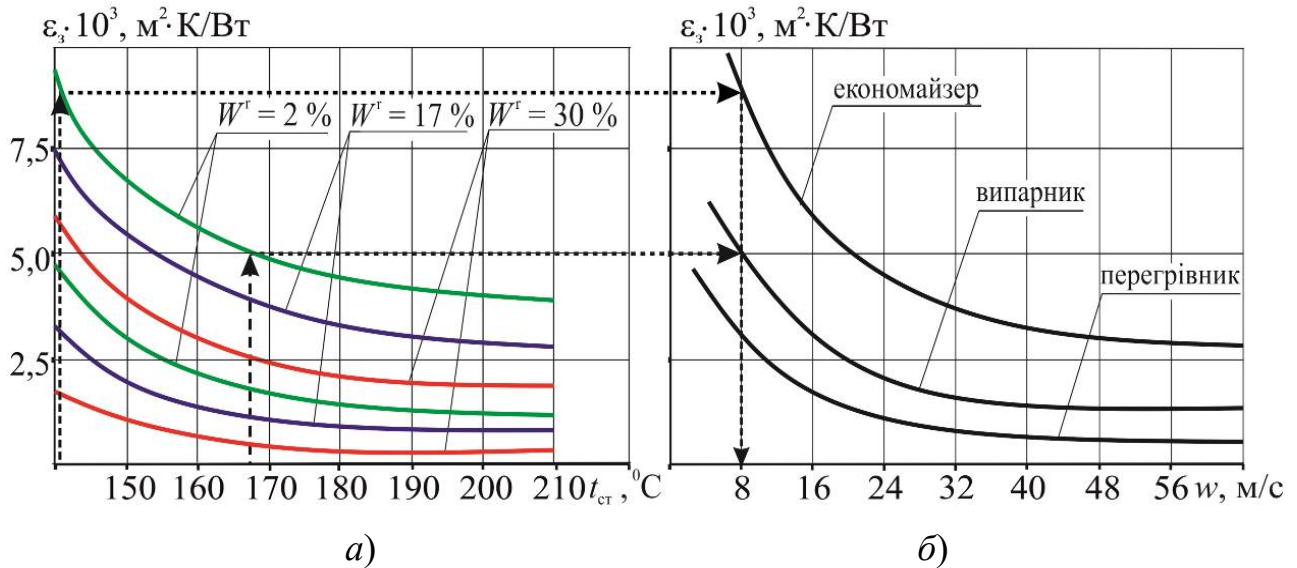


Рис. 5.4. Порівняння залежностей коефіцієнтів забруднень від швидкості газів для зони $t_{ct} = 210 \dots 140 \text{ }^\circ\text{C}$: а) отримані експериментально-розрахункові дані при $w_r = 8 \text{ м/с}$ (позначення позицій див. рис. 5.1); б) рекомендовані дані [142] для поверхонь УК

Достовірність отриманих значень ε_3 для конденсаційних поверхонь при використанні мазутів можна оцінити, порівнявши з даними [30] (рис. 5.5), де представлена зміна коефіцієнта забруднення ε_3 економайзера, розрахованого на роботу з температурами стінки нижче точки роси пари кислоти (на вході температура води $66 \text{ }^\circ\text{C}$, на виході $105 \text{ }^\circ\text{C}$) в залежності від тривалості його роботи (коефіцієнт забруднення збільшується вже в перші години роботи і практично стабілізується на постійному рівні $\varepsilon_3 = 0,055 \dots 0,058 \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт}$ після 300...400 годин впливу потоку газів).

Порівняння показує, що отримані в результаті експериментально-розрахункових досліджень значення ε_3 для конденсаційної зони при значеннях t_{ct} нижче $120 \text{ }^\circ\text{C}$ при використанні мазуту (рис. 5.3) практично співпадають з експлуатаційними даними [30].

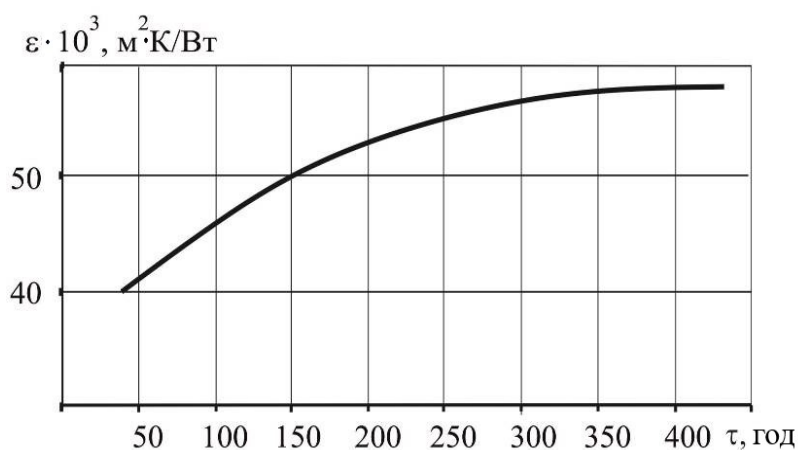


Рис. 5.5. Залежність коефіцієнта забруднення низькотемпературного економайзера в часі

Отже, слід вважати достовірними і результати аналогічних досліджень коефіцієнтів забруднення ε_3 конденсаційних і сухих поверхонь при використанні ВПЕ з $W^r = 30\%$, проведених на одній експериментальній установці за однаковою методикою, що підтверджує достовірність прийнятих значень Π .

Згідно з результатами досліджень при однаковій температурі стінки і швидкості газів коефіцієнт забруднення ε_3 при використанні ВПЕ в 2...2,6 рази менше в порівнянні з режимом використання рідкого палива при $W^r = 2\%$ внаслідок впливу безперервно діючого звукового поля, створюваного мікрровибухами крапель ВПЕ.

При визначенні коефіцієнта забруднення ε_3 необхідно враховувати швидкість газів, діаметр труб і кроки їх розташування, значення $t_{ст}$, умови впливу режимів горіння і складу палив.

Були отримані залежності ε_3 від швидкості газів w_r і водовмісту емульсії W^r (рис. 5.6) для конденсаційної ($t_{ст}$ нижче $120^\circ C$) і сухої ($t_{ст}$ вище $140^\circ C$) поверхні нагріву.

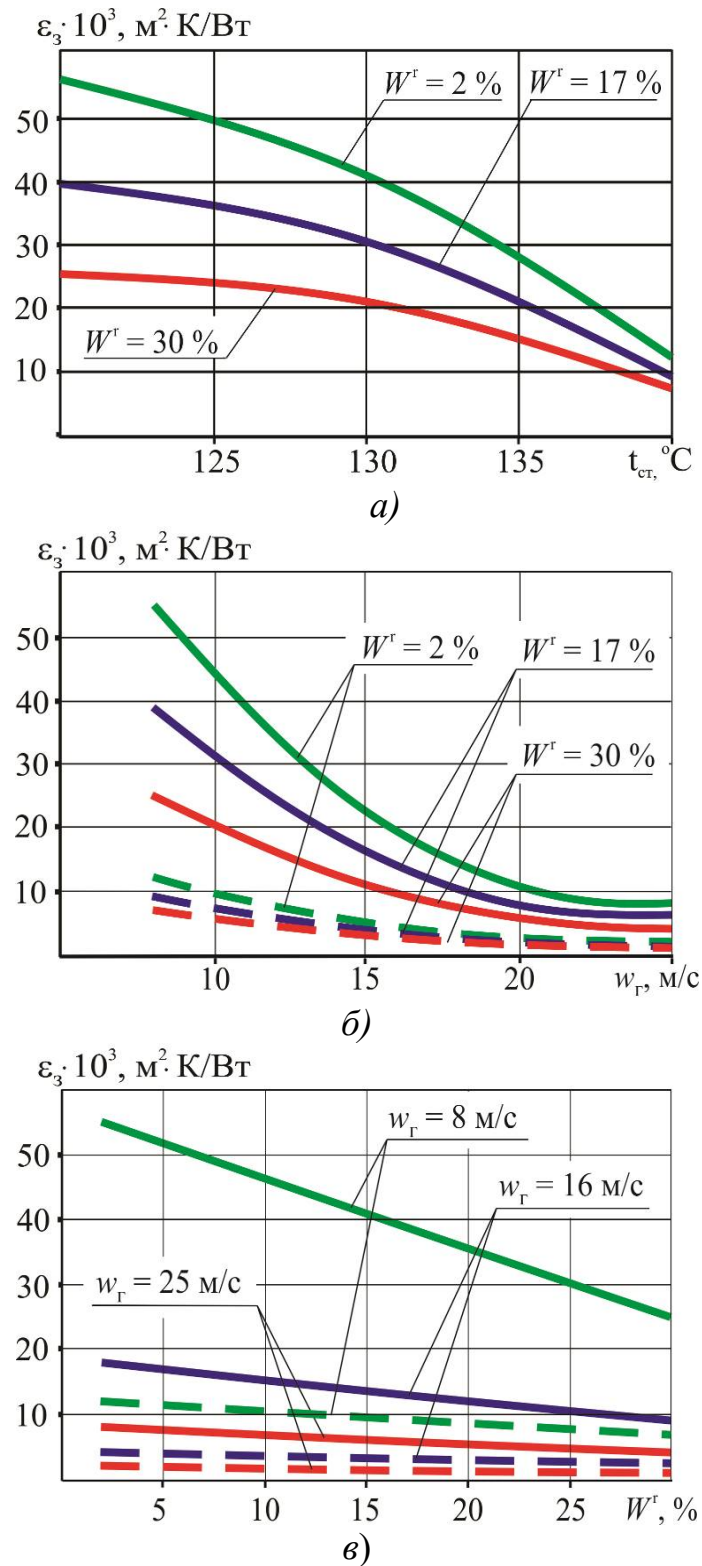


Рис. 5.6. Залежність коефіцієнта забруднення ε_3 ($\alpha = 2,9, S^r = 1,5\%$) від:

а) температури стінки $t_{\text{ст}}$ при різному водовмісті W^r ;

б) від швидкості газів w_r при різному водовмісті W^r ;

в) водовмісту W^r ВПЕ при разній швидкості газів w_r ;

— — $t_{\text{ст}} = 120^\circ\text{C}$; ---- — $t_{\text{ст}} = 140^\circ\text{C}$.

При проведенні теплотехнічних розрахунків НТПН необхідно провести послідовні розрахунки: для парорідинної зони ($t_{\text{ст}} = 120 \dots 140 \text{ }^\circ\text{C}$) слід приймати змінні значення ε_3 от $t_{\text{ст}}$ (рис. 5.6); в діапазонах $t_{\text{ст}}$, рівних $120 \text{ }^\circ\text{C}$ і нижче (до $70 \text{ }^\circ\text{C}$) (конденсаційні поверхні) і $t_{\text{ст}}$, рівні $140 \text{ }^\circ\text{C}$ і вище (до $240 \text{ }^\circ\text{C}$) (сухі поверхні), слід приймати постійні значення ε_3 залежно від рівня обводнення.

Статистична обробка даних (рис. 5.7) дозволила отримати рівняння, що враховує вплив на величину ε_3 температури стінки $t_{\text{ст}}$, швидкості газів $w_{\text{Г}}$ та вмісту ВПЕ W^r у вигляді:

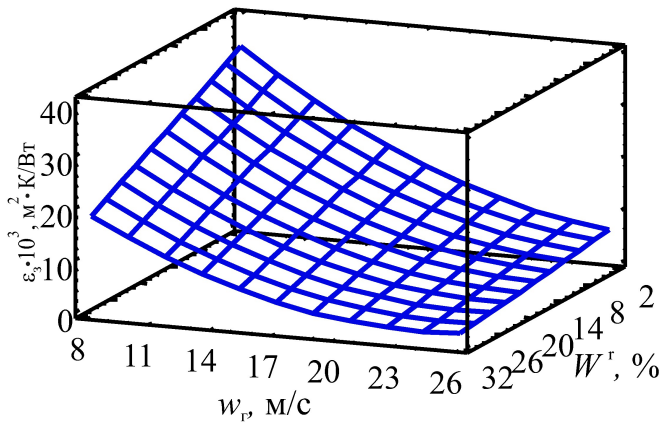
$$\varepsilon_3 = (207,419 - 0,1797t_{\text{ст}} - 3,6845W^r - 11,3073w_{\text{Г}} - 0,0072(t_{\text{ст}})^2 + 0,0226t_{\text{ст}}W^r + 0,05709t_{\text{ст}}w_{\text{Г}} + 0,0002(W^r)^2 + 0,0233W^rw_{\text{Г}} + 0,066(w_{\text{Г}})^2) \cdot 10^{-3}$$

На величину ε_3 перш за все впливає швидкість газів $w_{\text{Г}}$, температура стінки $t_{\text{ст}}$ і вміст води W^r в ВПЕ (рис. 5.7).

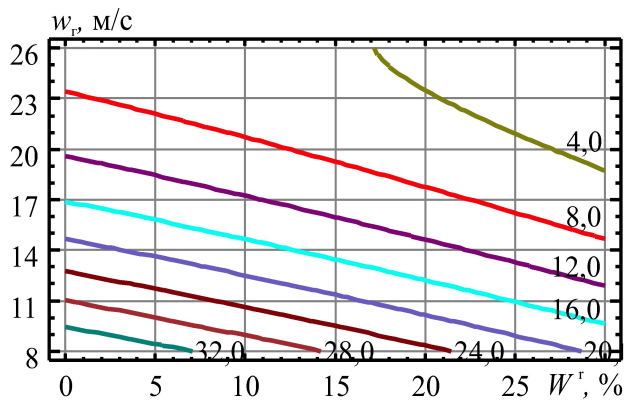
Знайдені залежності коефіцієнтів забруднення ε_3 (рис. 5.3), дають можливість визначати значення коефіцієнтів теплопередачі k_3 . Були проведені розрахункові дослідження і побудовані залежності коефіцієнтів теплопередачі k_3 з врахуванням збільшення α_1 в 1,5 рази (див. розділ 4) при температурах поверхонь нагріву в діапазоні $70 \dots 210 \text{ }^\circ\text{C}$ при використанні ВПЕ і мазуту (рис. 5.8).

Згідно рекомендацій [142] при проектуванні поверхонь нагріву краще оцінювати вплив забруднень за значеннями теплової ефективності ζ , бо вони дозволяють виявити спільний вплив на величину коефіцієнта k_3 забруднення труб і нерівномірності їх омивання.

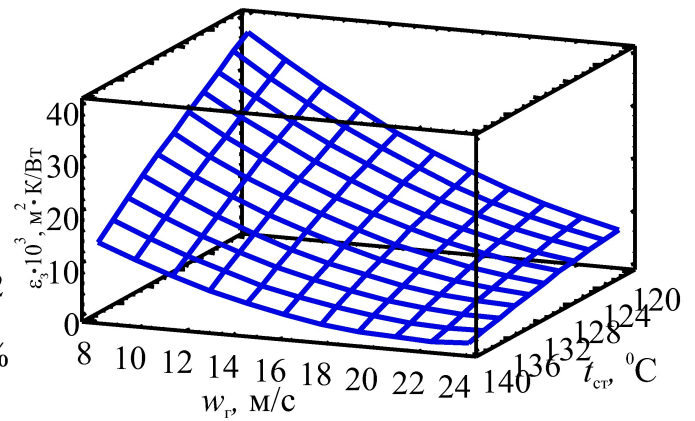
Отримані при однакових умовах розрахункові дані залежності коефіцієнтів теплової ефективності ζ (відношення коефіцієнтів теплопередачі забрудненої і чистої поверхонь) (рис. 5.9) показують, що при використанні ВПЕ з $W^r = 30 \%$ значення інтенсивності теплопередачі НТПН вище практично в 2 рази в порівнянні з використанням рідкого палива з $W^r = 2 \%$ при $t_{\text{ст}}$ нижче $130 \text{ }^\circ\text{C}$.

Тривимірна поверхня при $t_{\text{ст}} = 130^\circ\text{C}$ 

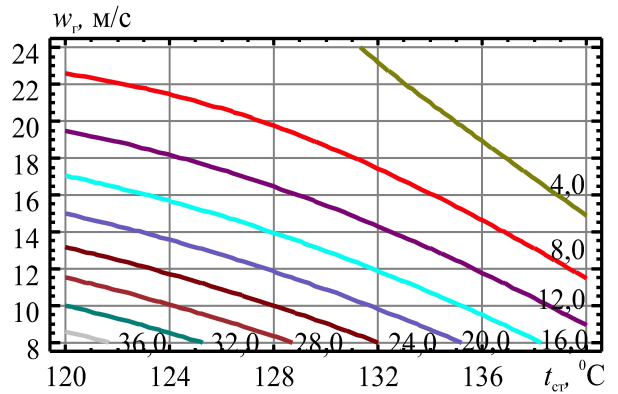
Контурна поверхня

при $t_{\text{ст}} = 130^\circ\text{C}$ 

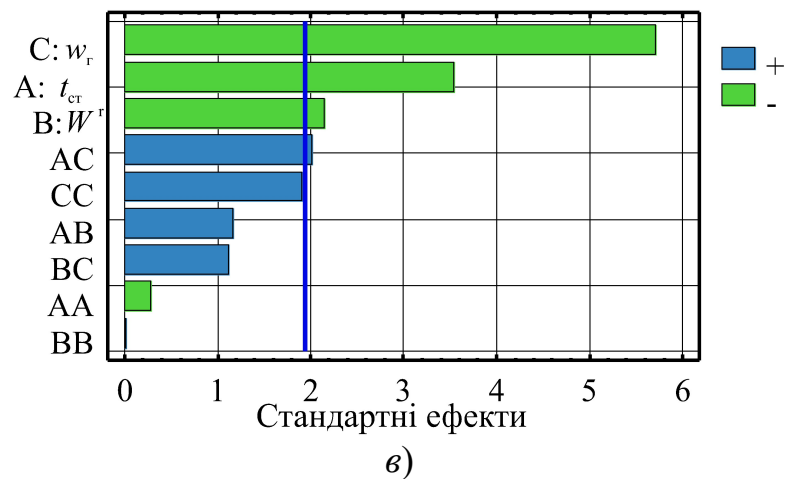
а)

Тривимірна поверхня при $W^r = 17\%$ 

Контурна поверхня

при $W^r = 17\%$ 

б)



в)

Рис. 5.7. Багатофакторна регресія $\varepsilon_3 = f(t_{\text{ст}}, w_r, W^r)$:а) $\varepsilon_3 = f(w_r, W^r)$ при $t_{\text{ст}} = \text{const}$;б) $\varepsilon_3 = f(w_r, t_{\text{ст}})$ при $W^r = \text{const}$;в) діаграма Парето для ε_3

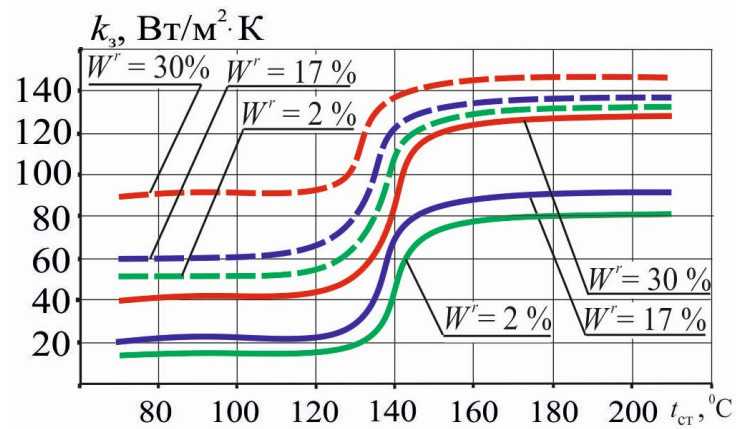


Рис. 5.8. Залежність коефіцієнта теплопередачі k_3 забрудненої поверхні нагріву від температури стінки $t_{\text{ст}}$ (при $\tau = 1000$ годин) при використанні: (позначення позицій див. рис. 5.1)

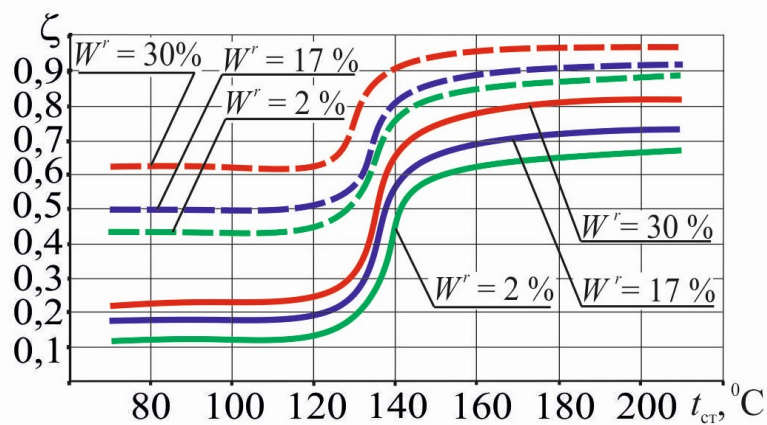


Рис. 5.9. Залежність коефіцієнта теплової ефективності ζ від температури стінки $t_{\text{ст}}$ (при $\tau = 1000$ годин) при використанні: (позначення позицій див. рис. 5.1)

5.3 Визначення періодичності очищення поверхонь нагріву і можливості збільшення теплової ефективності

За результатами залежностей $\Delta G_3 = f(\tau)$ [89] і розрахункових значень $\delta_3 = f(\tau)$ (рис. 5.1) і $\varepsilon_3 = f(\tau)$ були отримані значення періодичності очищення для сухої поверхні (рис. 5.10), які показали, що при використанні рідкого палива з $W^r = 2\%$ періодичність очищення становить 1000 годин, а при

використанні ВПЕ з $W^r = 30\%$ - 2500 годин, що відповідає експлуатаційним даним [152].

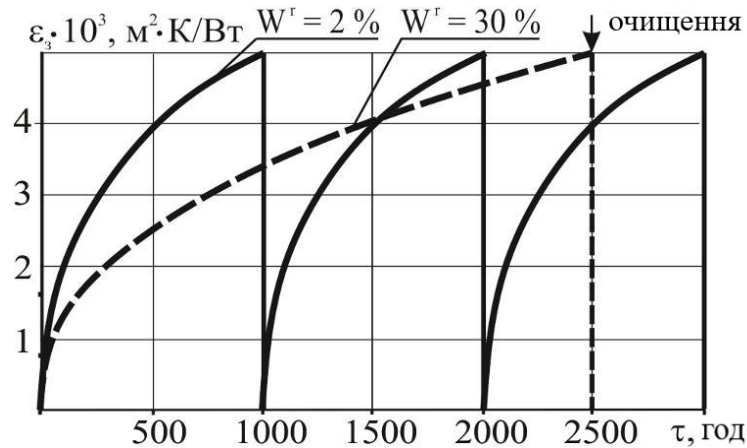


Рис. 5.10. Визначення періодичності очищення при досягненні однакового коефіцієнта забруднення для сухої поверхні нагріву

При розрахунках періодичності очищення прийнято, що при різних режимах використання палив все відкладення видаляються аж до шару сульфатів. За допомогою отриманих графіків (рис. 5.9) залежностей коефіцієнтів теплової ефективності ζ від часу впливу потоку газів надається можливість визначити періодичність інтенсивного очищення. Істотне зниження коефіцієнта теплової ефективності в конденсаційній зоні при часі впливу потоку газів $\tau = 1000$ годин (рис. 5.9) вказує на те, що з метою одержання високих значень ζ необхідно зменшувати період між «сильними» очищеннями (наприклад, шляхом обмивки).

Для конкретних НТПН з урахуванням отриманих значень $\tau_{\text{пер}}$ були рекомендовані значення ζ при розрахункових температурах $t_{\text{ст}}$ в діапазоні 70...130 °C знаходитимуться в межах: 0,75 при використанні ВПЕ з $W^r = 30\%$, 0,65 при використанні ВПЕ з $W^r = 17\%$, 0,55 при використанні М40 ($\tau_{\text{пер}} = 8$ годин - один раз на зміну) (рис. 5.11).

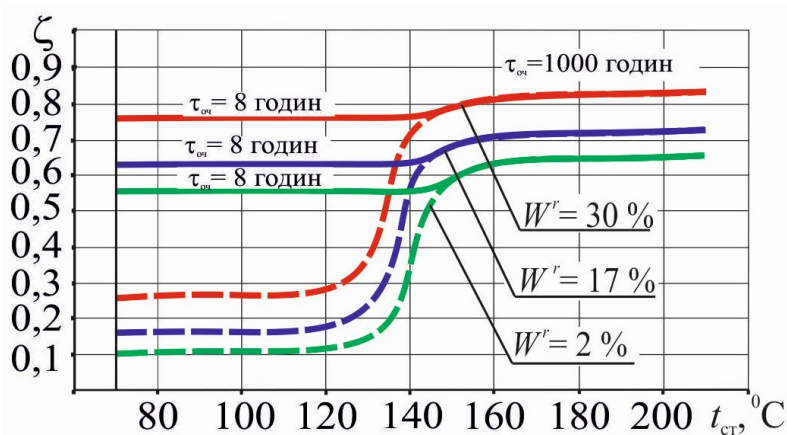


Рис. 5.11. Залежність коефіцієнта теплової ефективності ζ від температури стінки $t_{ст}$ (при $\tau = 1000$ годин) при використанні мазуту і ВПЕ

При однаковій швидкості газів ефективність теплопередачі при використанні ВПЕ вище, що при однаковій тепловій потужності призведе до зменшення необхідної поверхні нагріву, а значить числа рядів труб (по ходу газів) і величини аеродинамічного опору $\Delta h_{ук}$, що важливо для УК, для яких значення сумарного аеродинамічного опору обмежене. Швидкість газів визначає і величину аеродинамічного опору $\Delta h_{ук}$, яке може перебувати в допустимих межах.

Зі збільшенням товщини забруднень (рис. 5.1) зменшується площа живого перетину в пучках труб, що призводить до збільшення $w_{г}$, а значить і $\Delta h_{ук} = f(w_{г}^2)$. Вказана залежність ідентична $\varepsilon_3 = f(\tau)$ і може бути визначена при розрахунках конкретної поверхні нагріву.

Таким чином, представлені у розділі залежності дають можливість визначити періодичність очищення за необхідними значеннями ε_3 , ζ і $\Delta h_{ук}$ для сухих і конденсаційних поверхонь УК і прийняти менші значення $\tau_{пер}$ для кожної з поверхонь УК.

Висновки по розділу 5

На основі проведених експериментальних і розрахункових досліджень встановлено наступне.

1. Для сухих поверхонь нагріву:
 - коефіцієнти забруднення ε_3 при $t_{ст}$ більше 130 °С при використанні ВПЕ на основі мазутів з $W^r = 30 \%$ при $\tau = 1000$ годин в $\sim 2,5$ рази нижче ніж при використанні мазутів з $W^r = 2 \%$;
 - коефіцієнти теплопередачі k_3 відповідно вище в 1,6 рази;
 - коефіцієнти теплової ефективності ζ відповідно вище в 1,4 рази;
 - при використанні ВПЕ на основі малов'язких палив абсолютні значення ε_3 нижче в $\sim 2,5$ рази, значення k_3 і ζ вище в $\sim 1,2$ рази в порівнянні з режимами використання ВПЕ, а співвідношення між режимами для мазутів і малов'язких палив практично однакові.
2. Для конденсаційних поверхонь нагріву:
 - коефіцієнти забруднення ε_3 при використанні ВПЕ з $W^r = 30 \%$ значно вищі (в ~ 10 разів) в порівнянні з сухими поверхнями;
 - коефіцієнти теплопередачі k_3 і теплової ефективності ζ значно нижчі в порівнянні з сухими поверхнями (в $\sim 5 \dots 6$ разів);
3. Рекомендується для одержання високих значень k_3 , ζ для конденсаційних поверхонь нагріву зменшити періодичність між очищеннями до 8 годин.
4. Отримані залежності коефіцієнтів ε_3 , k_3 і ζ для сухих і конденсаційних поверхонь нагріву рекомендуються для застосування при проектуванні конвективних поверхонь нагріву УК, які не представлені в сучасних нормативних документах.

Результати досліджень в розділі з даної дисертаційної роботи знайшли своє відображення в наступних публікаціях автора [41, 40, 92, 93].

РОЗДІЛ 6

**РОЗРОБКА ТА АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ СХЕМО-
ТЕХНІЧНИХ РІШЕНЬ КОНТУРІВ УТИЛІЗАЦІЇ ТЕПЛОТИ В
КОГЕНЕРАЦІЙНИХ УСТАНОВКАХ ПРИ ВИКОРИСТАННІ
ВОДОПАЛИВНИХ ЕМУЛЬСІЙ**

6.1 Ефективність використання водопаливних емульсій в дизель-генераторах когенераційних установок

З метою порівняльної оцінки ефективності використання ВПЕ на основі сірчастого мазута (з $S^r = 0,5 \dots 2,0 \%$) прийнято варіанти зимового і літнього режимів роботи КЕУ без врахування впливу добових коливань теплового і електричного навантаження. При розрахунках витрати органічного палива у складі ВПЕ враховувалось (згідно літературних даних): зменшення витрат рідкого палива в ДГ на 8 % при використанні ВПЕ з $W^r = 25 \%$ (75 % рідкого палива) [116, 115]; зменшення витрати органічного палива в топці ВК на 25 % [55] при використанні тієї ж ВПЕ.

В суднових двигунах ступінь підвищення тиску доходить до 5, що підвищує температуру наддувного повітря за компресором до 250 °С, що розширює можливості використання теплоти наддувного повітря.

При розробці схем утилізації теплоти відхідних газів ДГ враховувались одержані в роботі дані з інтенсивності НТК, що дають можливість знизити температуру відхідних газів за УК зі ~160 °С (при використанні мазуту з S^r до 2 %), до 90 °С (при використанні ВПЕ з W^r до 30 % на основі цього ж мазуту).

В процесі розрахункових досліджень у разі необхідності допалювання палива перед УК визначалася сумарна витрата палива B_Σ на КЕУ і величина додаткової витрати палива на допалювання β_d у відсотках по відношенню до витрати палива на ДГ, а також величина потужності, що додатково виробляється в УТГ по відношенню до потужності ДГ. При визначенні цієї

потужності підсумовувалась електрична потужність від ДГ і додаткова електрична потужність УТГ в літньому режимі.

Коливання добового навантаження як електричного, так і теплового можливо забезпечити за рахунок зміни навантаження всіх генеруючих енергію елементів КЕУ (ДГ, УТГ, УК, ВК) і допалювання різної кількості додаткового палива перед УК (бажано ВПЕ), що розширює можливості КЕУ.

Розрахункові дослідження і порівняння ефективності різних схем утилізації були виконані для КЕУ, в якій в якості ДГ прийнятий двигун фірми «WARTSILA NSD corp.» марки 16V32 при номінальній потужності 9280 кВт з питомою витратою палива 0,195 г/(кВт·год) і температурою відхідних газів 350 °С. Теплова потужність ВК складала 10690 кВт.

Електричне навантаження при роботі ДГ в зимовому і літньому режимах постійні і складають 8910 кВт.

Влітку, коли необхідно зменшувати теплову потужність і збільшувати електропостачання, електрична потужність КЕУ підвищується до 9710 кВт шляхом підключення УТГ, на який може спрямуватись уся пара УК двох тисків (УК2). Тоді теплова потужність для гарячого водопостачання (ГВП) забезпечується за рахунок утилізації теплоти охолоджувача наддувного повітря (ОНП) і встановлення секції ГВП в УК. В літній період теплова потужність складає 3564 кВт (30 % загального теплового навантаження).

Взимку теплове навантаження складає 10692 кВт і забезпечується підключенням водогрійного котла (ВК), або УК і ВК, і (або) за допомогою СДП при використанні УК і ВК.

Розрахункові схеми ТУК у складі КЕУ при використанні мазуту представлені на рис. 6.1, а при використанні ВПЕ з врахуванням можливості встановлення конденсаційних поверхонь нагріву з температурою поверхні $t_{ст}$ до 70 °С – на рис. 6.2. Зменшення $t_{ст}$ забезпечує можливість встановлення третьої пороутворюючої поверхні з тиском 150 кПа і $t_s = 112$ °С, що збільшує потужність УТГ, і секції ГВП.

Розрахункові дослідження були проведені на ЕОМ за наступними варіантами: В1-В6 – зимовий період, В7-В8 – літній). В якості бази для порівняння був прийнятий варіант В1, коли не застосовується утилізація всіх втрат теплоти ДВЗ. Тоді склад КЕУ наступний: $B1 = ДГ + ВК$. Теплове навантаження забезпечується від ВК, а також ОНП, електричне навантаження - від ДГ.

Варіант $B2 = ДГ + УК + ВК$: УК двох тисків забезпечує теплове навантаження. Можливу нестачу теплоти закриває ВК. ДГ забезпечує споживачів електроенергією. Економія палива для КЕУ склала 21 %.

Варіант $B3 = ГД + УК + Д$ - уся пара УК двох тисків спрямовується на теплопостачання та ГВП. Нестача теплоти покривається за рахунок теплоти УК при допалюванні 10,7 % додаткового палива в газоході перед УК. ДГ забезпечує споживачів електроенергією. Економія палива на КЕУ - 30 %.

$B4 = ДГ + ВК$ – схема без утилізації теплоти при використанні ВПЕ у ДГ і ВК, що є базою порівняння для варіантів при використанні як мазуту, так і ВПЕ з водовмістом $W^r = 25$ %. Теплове навантаження забезпечується від ВК, електричне навантаження - від ДГ. Витрата чистого палива на ДГ на 8 % нижче, ніж при використанні мазуту [116, 115], а витрата вихідного палива у ВПЕ на ВК на 25 % нижче ніж при використанні мазуту [55], тоді економія палива в порівнянні з варіантом В1 склала 14 %.

Варіант $B5 = ДГ + УК + ВК$ – УК трьох тисків із секцією ГВП забезпечує теплове навантаження. Нестачу теплоти закриває ВК. ДГ забезпечує споживачів електроенергією. Економія палива КЕУ склала 22 % в порівнянні з В4.

Варіант $B6 = ДГ + УК + Д$ – УК трьох тисків забезпечує теплове навантаження. Нестачу пари виробляє УК, за рахунок допалювання 3,2 % додаткової ВПЕ в газоході перед УК. ДГ забезпечує споживачів електроенергією. Економія палива КЕУ – 30 % в порівнянні з В4 і 40 % - з В1.

Варіант $B7 = ДГ + УК + УТГ$ – утилізація теплоти ОНП і охолоджуючої води ДГ і частка теплоти УК двох тисків забезпечує теплове навантаження.

Надлишок пари УК відправляється на УТГ. Це дозволяє отримати 600 кВт додаткової електричної потужності. ДГ забезпечує споживачів електроенергією. Економія палива КЕУ - 36 % в порівнянні з В1. Паливо спалюється тільки в ДГ.

Варіант В8=ДГ+УК+УТГ – теплове навантаження забезпечується за рахунок утилізації теплоти ОНП, охолоджуючої води і секції ГВП УК. Вся пара УК трьох тисків відправляється на УТГ, що дозволяє отримати 800 кВт електричної потужності. ДГ забезпечує споживачів електроенергією. Економія палива КЕУ – 32 % в порівнянні з В4 і 42 % - з В1.

В зв'язку з суттєвим зниженням витрати вихідного палива при використанні ВПЕ в ДГ і ВК, а також при допалюванні ВПЕ перед УК, за рахунок значної теплової потужності при утилізації теплоти ОНП і охолодження ДВЗ (без прямої витрати палива) в варіантах В5 і особливо В6 одержано високі значення $\eta_{\text{тепл}}$, що призвело до підняття значення коефіцієнта використання теплоти палива $\eta_{\text{вти}}$ у варіанті В6 на рівні 100 %, що треба розглядати, як умовне, бо одержано без прямого використання палива.

Результати варіантів роботи різного складу КЕУ представлені на рис. 6.3.

У розглянутих варіантах КЕУ використовуються УК двох і трьох тисків з багатократнопримусовою циркуляцією (БПЦ) і з використанням сепараторів пари, з підігрівом до 130 °С води в ОНП перед економайзером при використанні мазуту і ВПЕ.

Розрахунки теплових діаграм указаних схем УК (рис. 6.4) показують, що за рахунок можливості при використанні ВПЕ з W^r до 30 % знизити значення $\vartheta_{\text{вих}}$ з 160 °С до 90 °С теплові потужності УК зростають на 40 %.

Проведені розрахунки дозволяють проаналізувати роботу пропонованої КЕУ у складі ДВЗ і УК, названої ПДУ при використанні в УК схем одного або двох тисків.

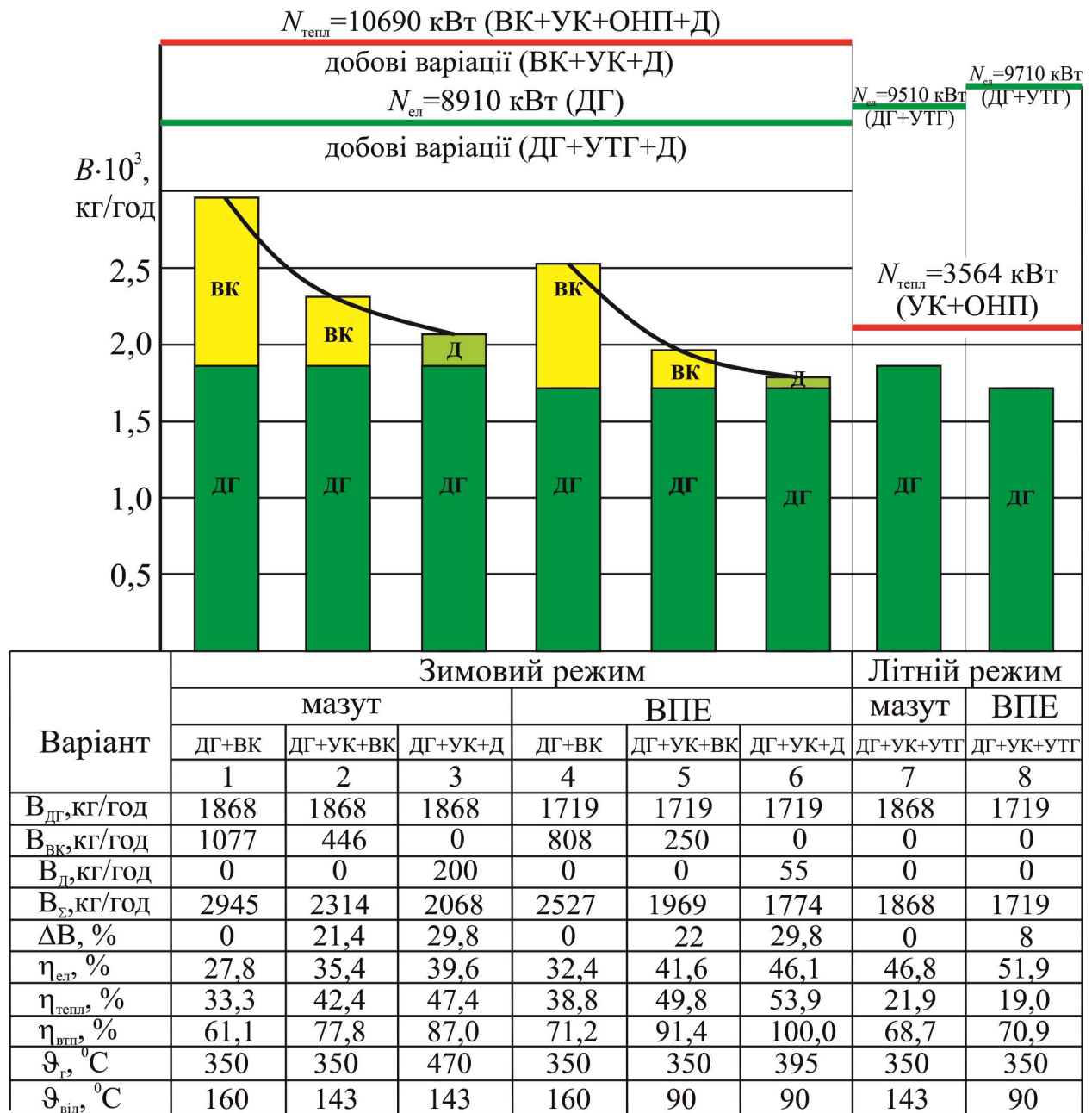


Рис. 6.3. Варіанти розрахункових схем КЕУ

В одноконтурній ПДУ зі зростанням p_0 при відсутності СДП зменшується паропродуктивність УК (рис. 6.5) і одночасно відбувається збільшення H_0 за рахунок як підвищення ентальпії пари, що генерується в УК, так і зміщення кінцевої точки процесу розширення пари в паровій турбіні в зону більшої вологості (в межах допустимого значення). Тому функціональна залежність $N_{\text{пту}}^e = f(D_0, H_{\text{пт}})$ є гладкою і має оптимум (рис. 6.6).

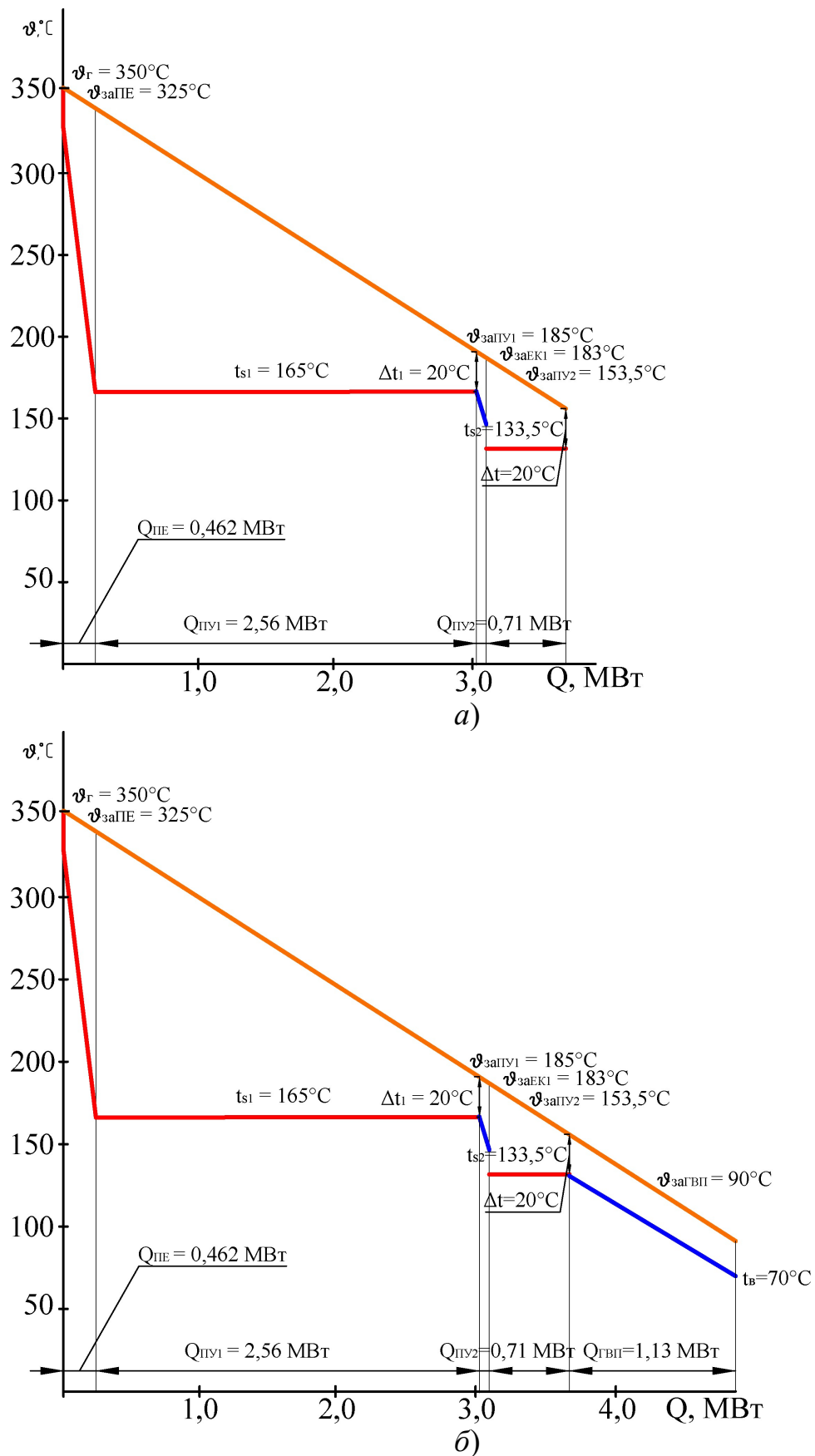


Рис. 6.4. Тепловы диаграммы різних схем утилізаційних котлів:

а) утилізаційний котел двох тисків; б) утилізаційний котел двох тисків із секцією гарячого водопостачання (конденсаційна поверхня)

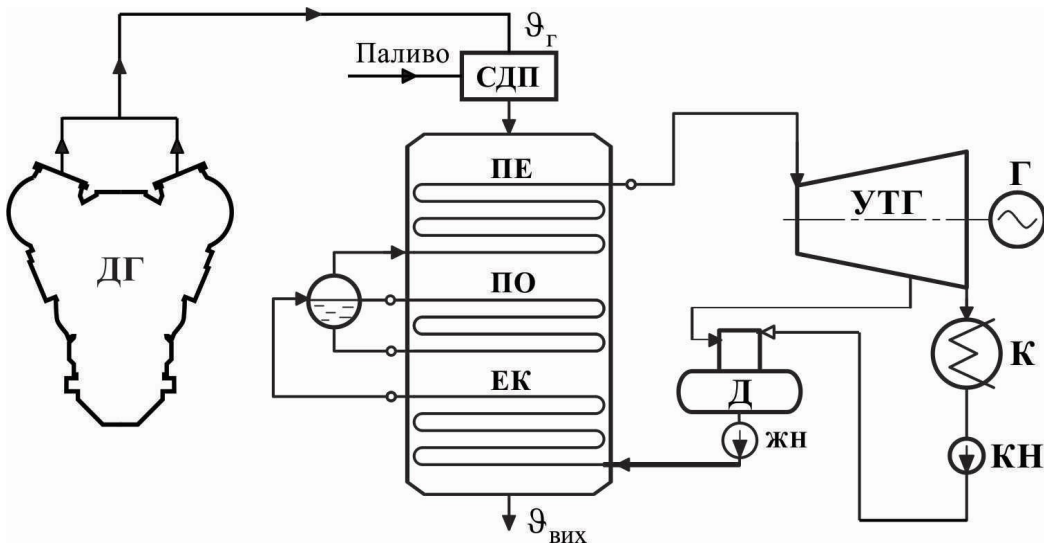


Рис. 6.5. Теплова схема теплоутилізаційного контуру КЕУ з УК одного тиску, що працює на мазуті

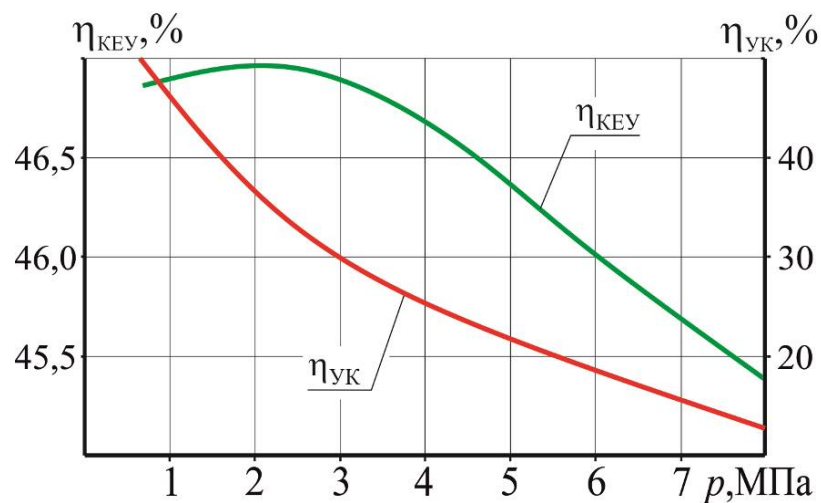


Рис. 6.6. Залежність ККД КЕУ і УК від тиску p_0

ККД УК, який також впливає на економічність всієї ПДУ, зі зростанням p_0 знижується через скорочення загальної кількості теплоти, переданої від потоку газів і відповідно витрати пари, що призводить до зростання температури відхідних газів $\Theta_{\text{вих}}$ за УК (рис. 6.7). В одноконтурному УК екстремум залежності $\eta_{\text{пду}} = f(p_0)$ не відповідає мінімальним значенням $\Theta_{\text{вих}}$, а з підвищенням p_0 відбувається збільшення $\Theta_{\text{вих}}$.

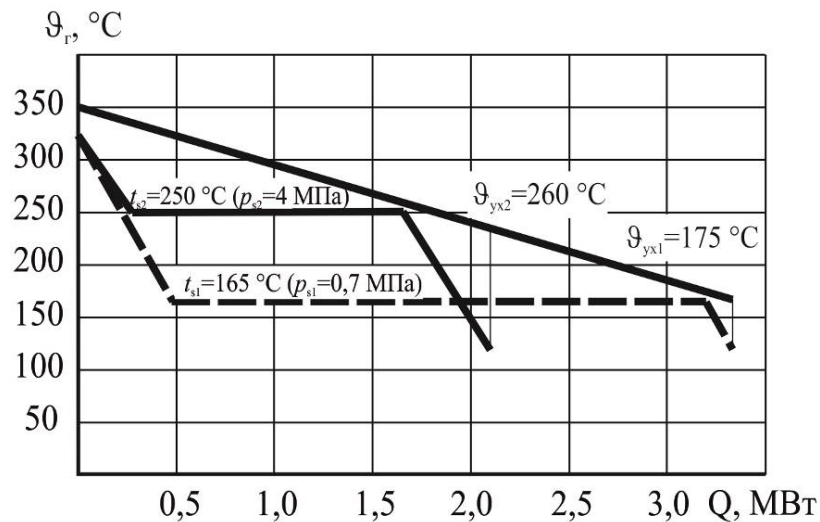


Рис. 6.7. Зміна температури відхідних газів з УК при зміні початкового тиску p_0

При використанні допалювання палива перед УК ($\beta_d > 0$) для кожного розрахункового значення $\beta_d = B_d/B_{дг}$ в точці оптимуму функція $\eta_{пду} = f(p_0)$ (рис. 6.7) максимальна потужність парової турбіни у складі ПДУ з одноконтурним УК і відповідно максимальна теплова економічність ПДУ в цілому мають місце при рівності відносних змін витрати пари D_0 і теплоперепаду H_0 , що спрацьовується, що відповідає даним [143].

При допалюванні палива перед УК кожному значенню β_d відповідає значення початкового тиску перегрітої пари $p_{пе}$, що зростає зі збільшенням β_d . В даний час парові турбіни малої потужності випускаються на граничні параметри перегрітої пари близько 9 МПа, 550 °С [151]. Такі параметри можуть оцінюватися як граничні для турбін подібного класу.

Обмеження подальшого збільшення економічності УК відбувається при досягненні мінімально допустимого значення $\theta_{вих}$ при відповідному значенні Δt за кінцевою поверхнею УК, яке приймається рівним 20 °С: за умови запобігання корозії низькотемпературних поверхонь нагріву УК при використанні рідкого газотурбінного палива при $S^r = 0,5\%$ – 120 °С [151], при використанні мазуту з вмістом сірки $\sim 2\%$ – 150...160 °С, а при використанні ВПЕ на їх основі – 90...100 °С, завдяки суттєвому зменшенню НТК у зв'язку з пасивацією металу конденсаційних НТПН.

Характер зміни УК одноконтурних ПДУ зі зростанням β_d у першу чергу залежить від економічності ГТУ, в ПГУ [151], а також судових ДВЗ в ПДУ і температури відхідних газів за ними.

Використання двоконтурної теплової схеми в паровій частині ПДУ дозволяє підвищити її економічність як за рахунок зниження до мінімально допустимого рівня $\vartheta_{\text{вих}}$ при установці пароутворюючої поверхні низького тиску, так і підвищення параметрів пари в контурі високого тиску. У двоконтурному УК (рис. 6.8) максимальна кількість може становити 7 поверхонь нагріву. В цьому випадку необхідні індивідуальні барабани і живильні насоси контурів високого та низького тиску. При використанні прямоточних УК (рис. 6.3) необхідність в установці громіздких і дорогих барабанів відпадає, але ускладнюються схеми автоматичного регулювання.

У двоконтурних ПДУ за вироблення пари в контурі низького тиску відбувається зниження $\vartheta_{\text{вих}}$ до мінімально допустимого розрахункового рівня 153°C при використанні мазуту.

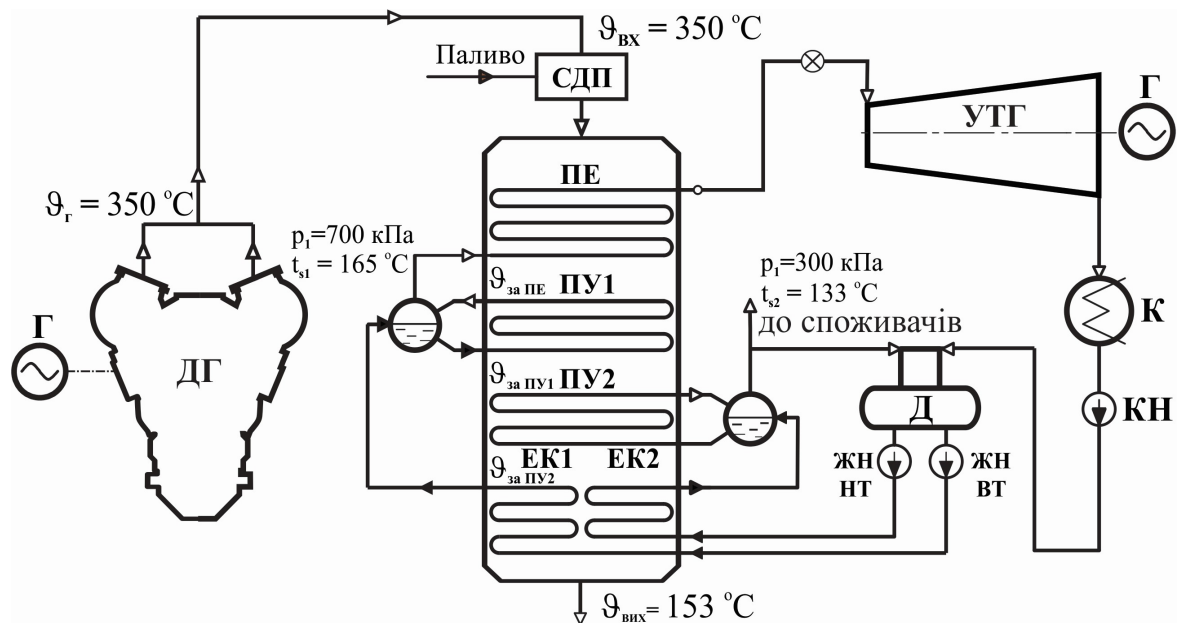


Рис. 6.8. Теплова схема теплоутилізаційного контуру КЕУ з УК двох тисків, що працює на мазуті

При цьому підвищення тиску пари $p_{\text{вт}}$ не призводить до збільшення $\vartheta_{\text{вих}}$ і, як наслідок, до зниження економічності УК. Тому для двоконтурних як ПГУ, так і ПДУ на базі СОД, підвищення початкових параметрів пари контуру ВТ при інших незмінних умовах однозначно призводить до збільшення економічності за рахунок підвищення ККД паротурбінного циклу та потужності парової турбіни. При цьому на відміну від ПГУ в ПДУ одночасно з роботою УК використовується утилізація теплоти ОНП, що додатково підвищує ККД ПДУ.

Так як кількість пари низького тиску і частка вироблення потужності цим потоком нижче, ніж у контурі високого тиску, при проектуванні як ПГУ [151], так і ПДУ визначальними є параметри контуру високого тиску, а параметри контуру низького тиску прийнято обирають таким чином, щоб при змішуванні у паровій турбіні обох потоків пари їх температури та ентальпії були близькими і при змішуванні пари контуру низького тиску не здійснювався вплив на параметри основного потоку. При використанні сірчистого мазуту в зв'язку з тим, що необхідно підтримувати $t_{\text{ст}} = 130^\circ\text{C}$ мінімальне значення $p_{\text{нт}}$ складає 300 кПа, якому відповідає $t_{\text{нт}} = 133^\circ\text{C}$ (мінімальне значення $t_{\text{ст}}$ за умови запобігання НТК при використанні сірчистого палива). При використанні ВПЕ з'являється можливість знизити температуру відхідних газів $\vartheta_{\text{г}}$ до 90°C , що дозволяє встановити третю пароутворюючу поверхню і (або) секцію гарячого водопостачання (рис. 6.9).

Для підвищення теплової потужності УК (а значить і ПТ УТГ) при збереженні постійного значення $p_{\text{вт}}$ і $p_{\text{нт}}$ зі збільшенням $\beta_{\text{д}}$ має місце зростання $\vartheta_{\text{г}}$ перед УК, що призводить до збільшення $N_{\text{ел}}$ або $N_{\text{тепл}}$ (рис. 6.10, а). При цьому паропродуктивність контуру високого тиску постійно зростає, а контуру низького тиску залишається майже постійною. Сумарне значення паропродуктивності і забезпечує зростання $N_{\text{ел}}$ і $N_{\text{тепл}}$ (рис. 6.10, б).

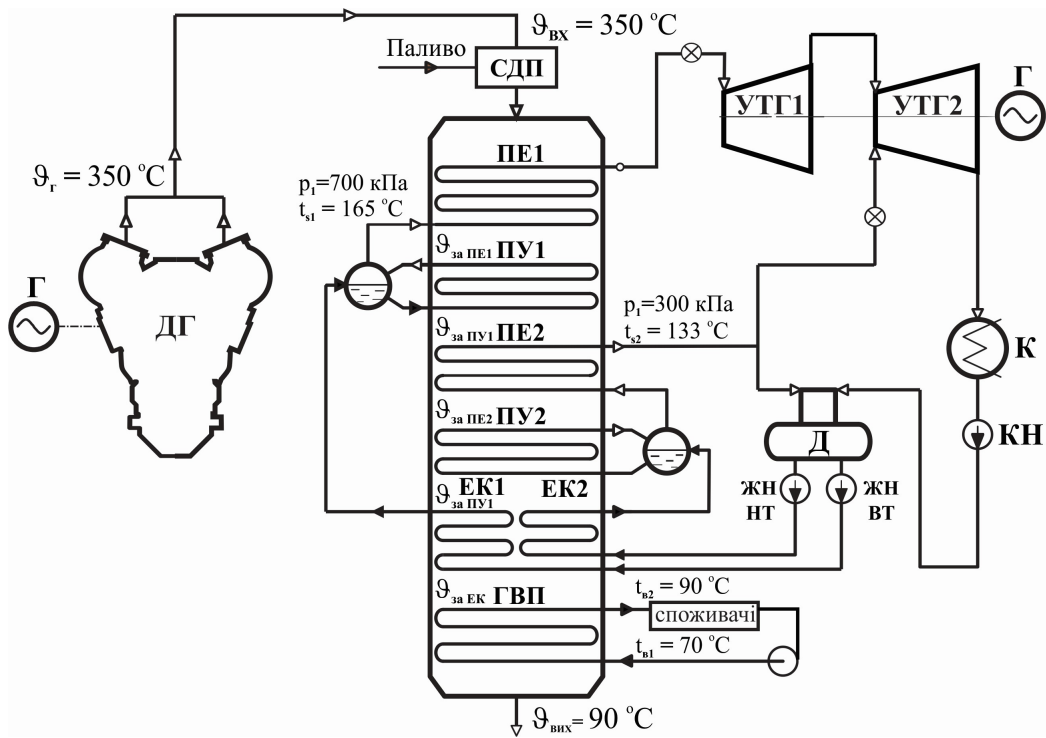
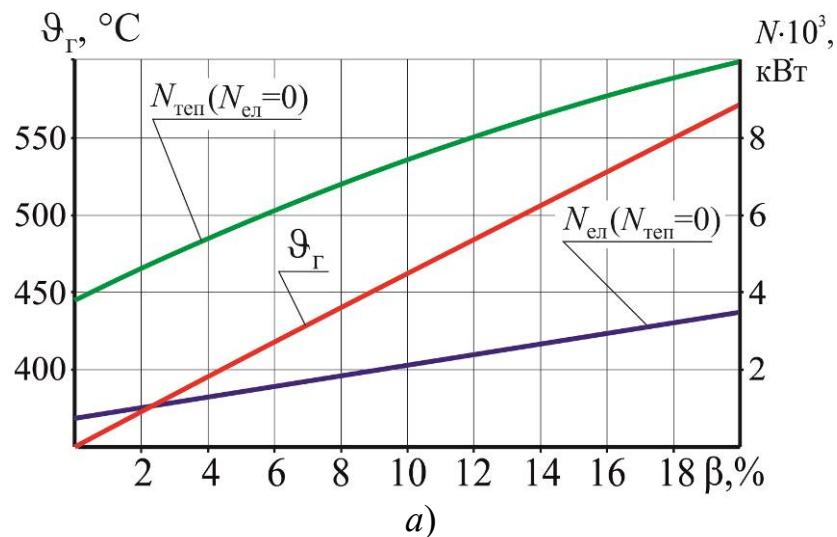


Рис. 6.9. Теплова схема теплоутилізаційного контуру КЕУ, що працює на ВПЕ

Оскільки в двоконтурній схемі температура відхідних газів за УК знаходиться на мінімальному рівні, то на відміну від одноконтурної ПДУ мається можливість підвищення ККД УК зі зростанням β_d , і мається резерв підвищення параметрів та економічності паротурбінної частини за рахунок збільшення спрацювання теплоперепаду в турбіні H_0 , а також пониження частки пару, що генерується контуром низького тиску з відносно невисоким потенціалом.



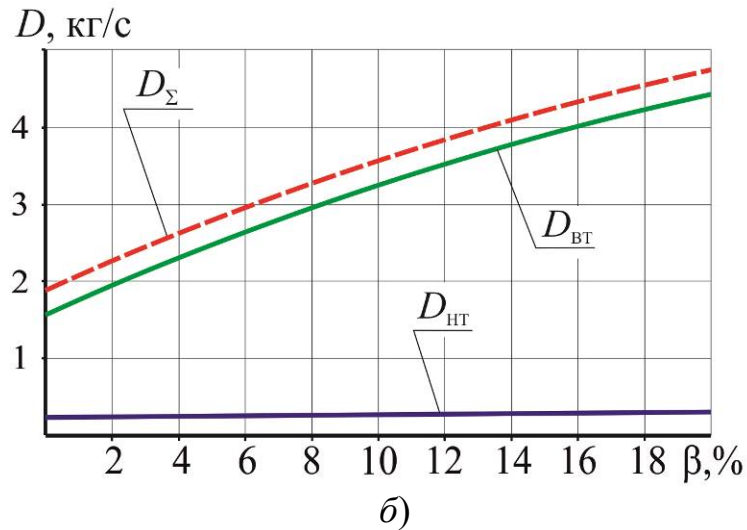


Рис. 6.10. Вплив кількості допалювання палива перед УК на: а) температуру газів на виході з УК $N_{\text{тепл}}$ (при $N_{\text{ел}} = 0$) і $N_{\text{ел}}$ (при $N_{\text{тепл}} = 0$); б) на витрати пари контурів ВТ і НТ і сумарної паропроductивності

Для УК двох тисків при збільшенні β_d при $p_{\text{вт}} = \text{const}$ температура газів перед контуром низького тиску зберігається, що забезпечує постійне значення $D_{\text{нт}}$ (рис. 6.10, б).

Збільшення β_d забезпечує підвищення значень η_d і $\eta_{\text{кеу}}$ при кожному оптимальному значенні тиску $p_{\text{вт}}$. Але при досягненні максимально можливого значення по економічності перших ступенів УТГ і її міцності має місце перелом при досягненні прийнятого граничного тиску, після якого $\eta_{\text{кеу}} = \text{const}$, а ККД допалювання η_d знижується (рис. 6.11). ККД УК безперервно зростає.

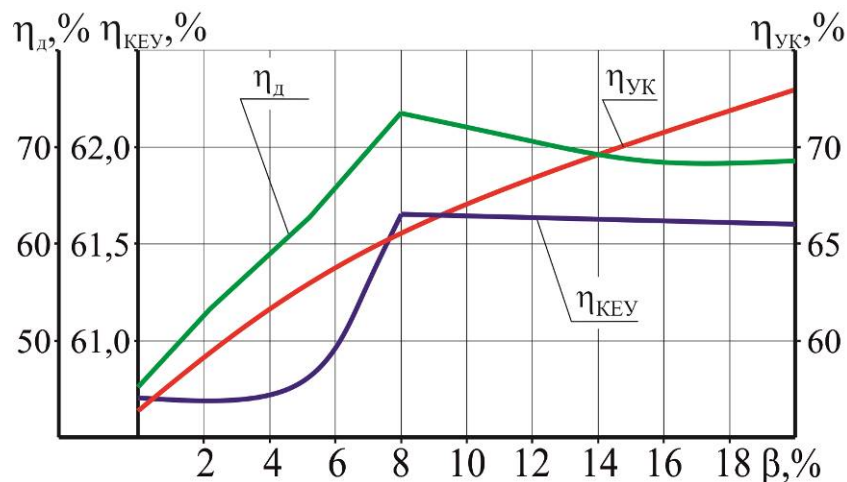


Рис. 6.11. Показники ефективності КЕУ

Залежність витрати пари високого і низького тисків (рис. 6.12, а) мають злам в точці досягнення граничних параметрів (9 МПа, 545 °С). З подальшим збільшенням β_d продовжується зниження D_{HT} (рис. 6.12, б). Після деякого критичного β_d більш прийнятною є схема УК тільки з одним контуром.

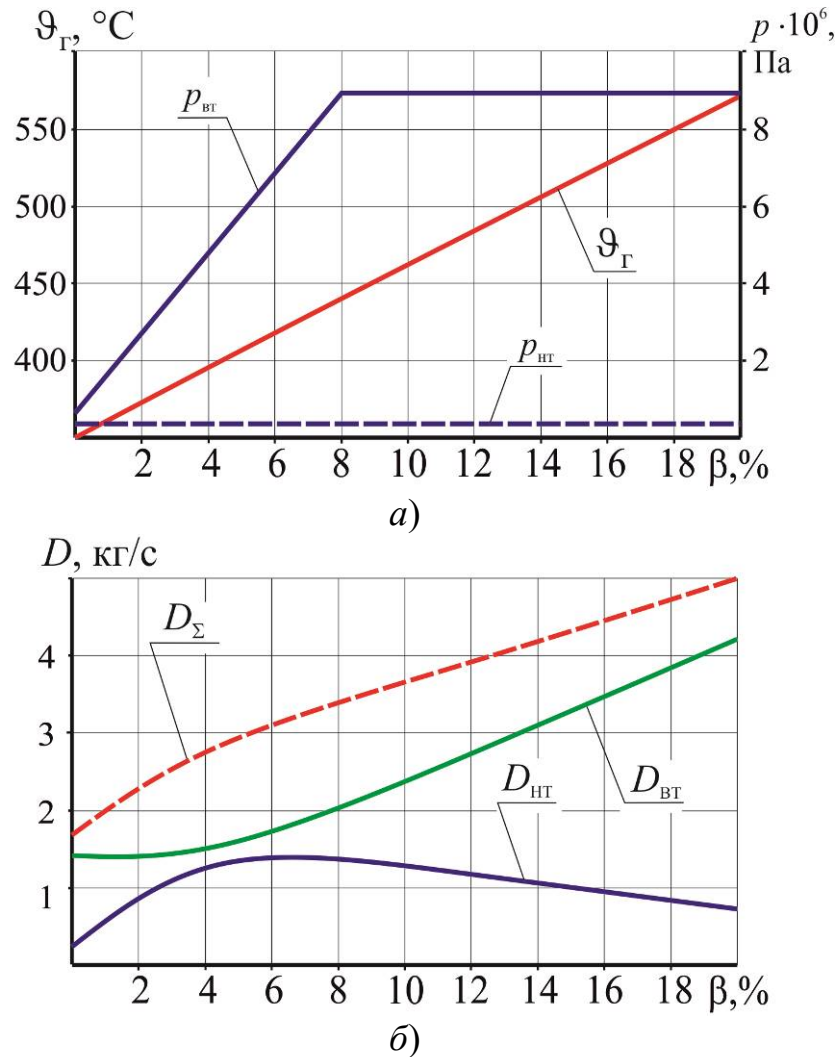


Рис. 6.12. Параметри схеми УК двох тисків зі зростанням долі допалювання палива: а) температура газів і значення тисків p_{BT} і p_{HT} ; б) витрата пари, що генерується контурами ВТ D_{BT} та НТ D_{HT} і сумарна витрата пари D_{Σ}

З підвищенням ступеня допалювання палива β_d , що обумовлює насамперед зростання температури газів перед УК, відбувається збільшення витрати пари контуру ВТ і підвищення початкових параметрів циклу ПТУ (t_{BT} і p_{BT}). Це дає можливість підвищувати електричну потужність КЕУ $N_{ел}$ за рахунок потужності УТГ двох тисків, або теплову потужність $N_{тепл}$, якщо виробляти в

УК максимальну кількість насиченої пари (рис. 6.13, а). Крім того, це обумовлює більш швидкий темп підвищення ККД УТГ (рис. 6,13, б).

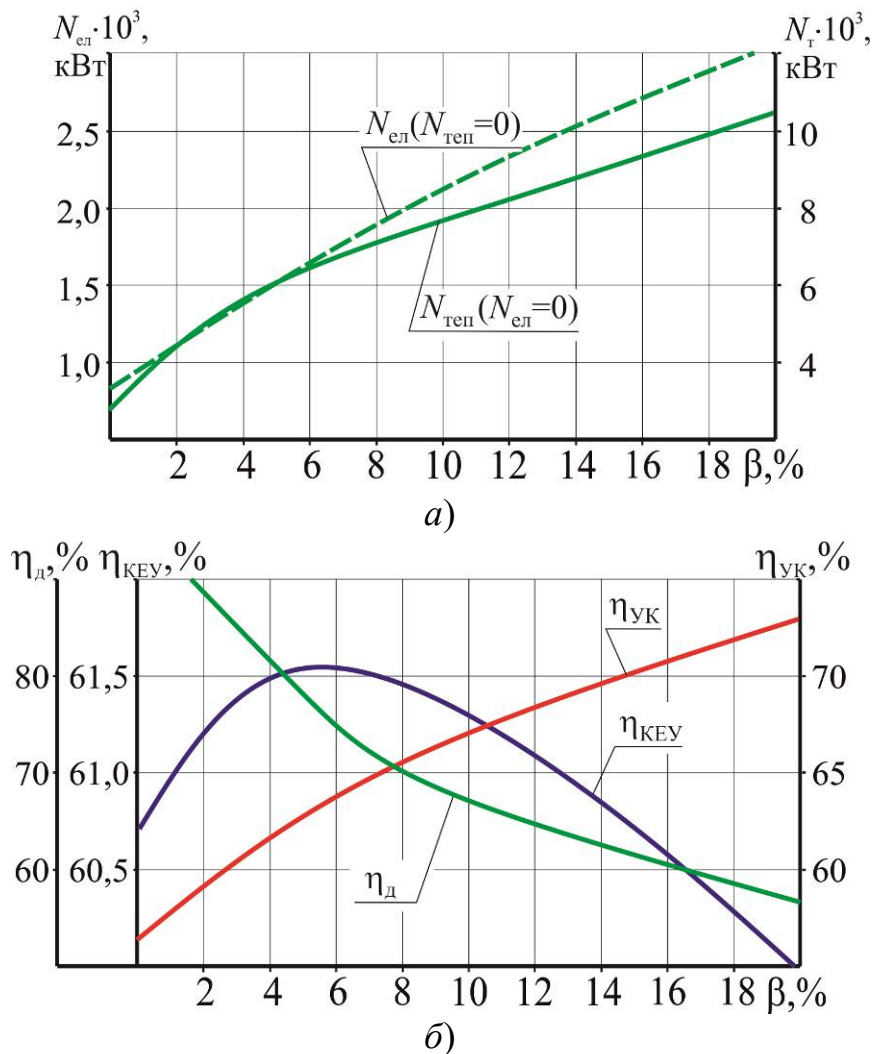


Рис. 6.13. Вплив ступеню допалювання палива на: а) електричну і теплову потужності КЕУ; б) економічність КЕУ

Доцільність використання в ПДУ додаткового використання палива у відхідних газах за ДВЗ повинна визначатися в сукупності з детальними оптимізаційними розрахунками параметрів пари обраної схеми ПДУ.

Застосування допалювання палива дозволяє підвищити економічність і потужність ПДУ з врахуванням суттєвого зниження температури відхідних газів за одноконтурним УК при використанні ВПЕ, що за певних умов може викликати деяке підвищення ККД ПДУ в цілому.

6.2 Результати досліджень характеристик різних схем і конструкцій утилізаційних котлів

З метою порівняння конструктивних і теплотехнічних характеристик різних схем ТУК і конструкцій УК за допомогою ЕОМ на основі останніх літературних даних були виконані теплові конструктивні розрахунки УК двох і трьох тисків з установкою пакетів поверхонь нагріву з примусовою багатократною примусовою циркуляцією і поверхні нагріву для системи ГВП з підігрівом живильної води до УК до рівня $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ в підігрівачах води, що встановлюються в ОНП, (це забезпечує захист поверхонь нагріву УК від НТК) і при температурі води на вході в секцію ГВП на рівні $70\text{ }^{\circ}\text{C}$, що стало можливим зі зменшенням інтенсивності НТК при використанні ВПЕ [46]. Для виявлення переваг проточних УК (на відхідних газах ДВЗ) були проведені їх розрахунки без попереднього підігріву живильної води (при $t_{\text{в}} = 70\text{ }^{\circ}\text{C}$ в конденсаційному баку). В цьому випадку теплота наддувного повітря використовувалась для підігріву води і для гарячого водопостачання, тобто розглядалась когенераційна схема одночасного використання теплоти вихлопних газів і наддувного повітря.

Метою розрахунків були дослідження впливу на характеристики УК кратності циркуляції і значення температурного напору за поверхнями нагріву Δt , які приймалися на рівні 20, 15, $10\text{ }^{\circ}\text{C}$. В цих схемах УК теплотехнічні характеристики пароперегрівача ($Q_{\text{пе}}$, $D_{\text{пе}}$) прийняті постійними.

При проведенні порівняльних досліджень за основу було прийнято забезпечення однакового аеродинамічного опору УК ($\Delta h_{\text{ук}} = \text{const}$) при постійній швидкості газів ($w_{\text{г}} = \text{const}$), що забезпечує однакоку інтенсивність конвективного теплообміну в поверхнях нагріву УК на відміну від даних [36], де для забезпечення $\Delta h_{\text{ук}} = \text{const}$ змінювалась швидкість газів $w_{\text{г}}$.

Для забезпечення умов $w_{\text{г}} = \text{const}$ при $\Delta h_{\text{ук}} = \text{const}$ змінювалось значення ширини газоходу b при $l = \text{const}$.

Теплові діаграми показують, що при забезпеченні прийнятих значень Δt не вдається відвести всю теплоту за рахунок економайзерних і пароутворюючих поверхонь, бо відведення теплоти обмежене температурами насичення t_s значенням Δt між температурою відхідних газів і води або пари.

Для забезпечення більш глибокої утилізації необхідно встановлювати секцію ГВП (навіть якщо температура живильної води $t_{жв}$ була б рівною $50\text{ }^{\circ}\text{C}$). І в цьому випадку мінімальне значення $\vartheta_{вих}$ обумовлене мінімальною температурою поверхні $t_{ст}$ нагріву і Δt_{min} . Мінімальне значення $t_{ст}$ залежить від інтенсивності НТК.

На основі проведених розрахунків побудовані наступні залежності теплотехнічних характеристик розглянутих схем УК.

При зменшенні значень Δt , що призводить до збільшення теплової потужності і зменшення середньологарифмічної різниці температур $\Delta t_{сеп}$, має місце зростання необхідної площі поверхонь нагріву $H_{ук}$ (рис. 6.14). Причому збільшення $H_{ук}$ відповідає зростанню сумарної паропродуктивності.

В зв'язку з цим збільшуються габарити відповідних конструкцій УК: висоти котлів $h_{ук}$ і їх габаритних об'ємів $V_{ук}$ (рис. 6.15) у зв'язку з ростом висоти УК $h_{ук}$ і його ширини b .

В залежності від можливості розміщення УК на судні можливе збереження виконання вимоги не тільки зміни ширини b і довжини l котла, а і збереження висоти котла $h_{ук} = \text{const}$ (при $\Delta h_{ук} = \text{const}$).

Представлені залежності показують, що вказані показники змінюються по-різному. Тому тільки важливо порівняти відносні показники особливо з врахуванням ККД утилізації, габаритних показників і значень Δt , а також енергетичних ККД (q_v , $П_v$). Ці залежності (6.16, 6.17) показують, що значний зріст ККД і збільшення габаритних показників має місце для прямотечійного котла при $\Delta t = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$.

При цьому слід відзначити, що при прямоточній схемі котла відсутні сепаратори пари, циркуляційні насоси, капітальні витрати на які складають половину (а то і більше) вартості поверхонь нагріву котлів.

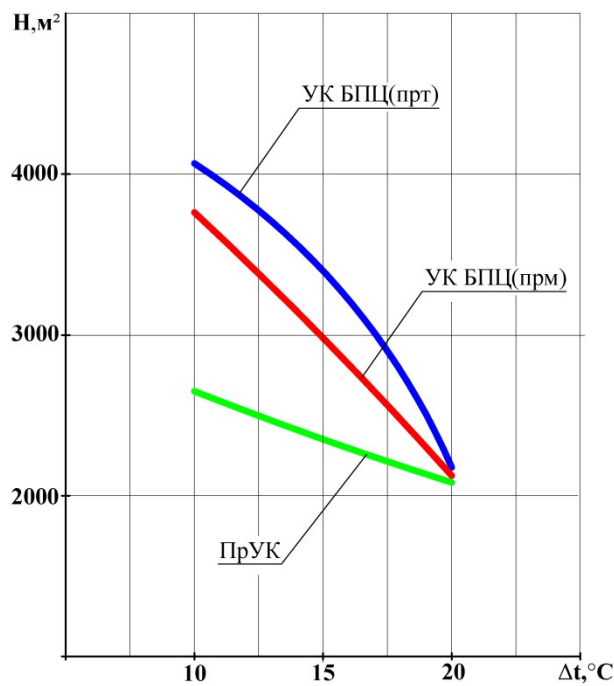


Рис. 6.14. Залежність площ поверхонь нагріву H_{uk} різних схем УК від температурного напору Δt

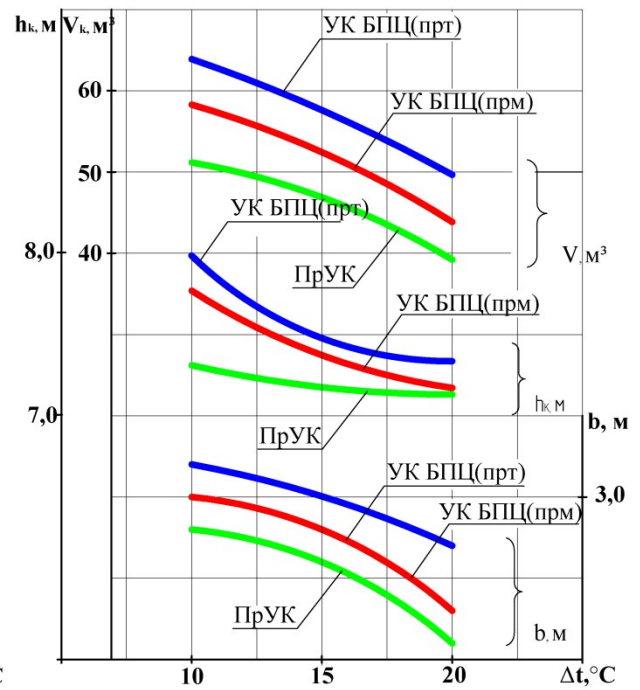


Рис. 6.15. Залежність об'єму V_{uk} , висоти h_{uk} і ширини b УК різних схем від температурного напору Δt

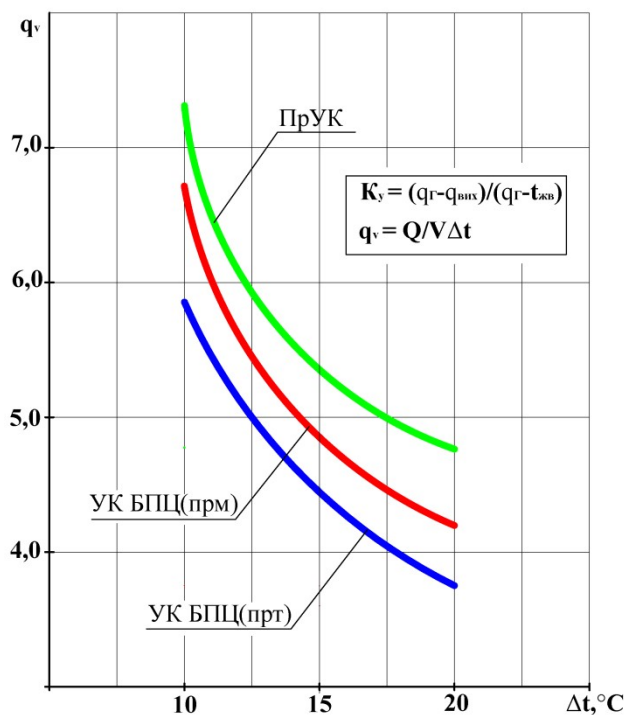


Рис. 6.16. Залежність показників q_v різних схем УК від температурного напору Δt

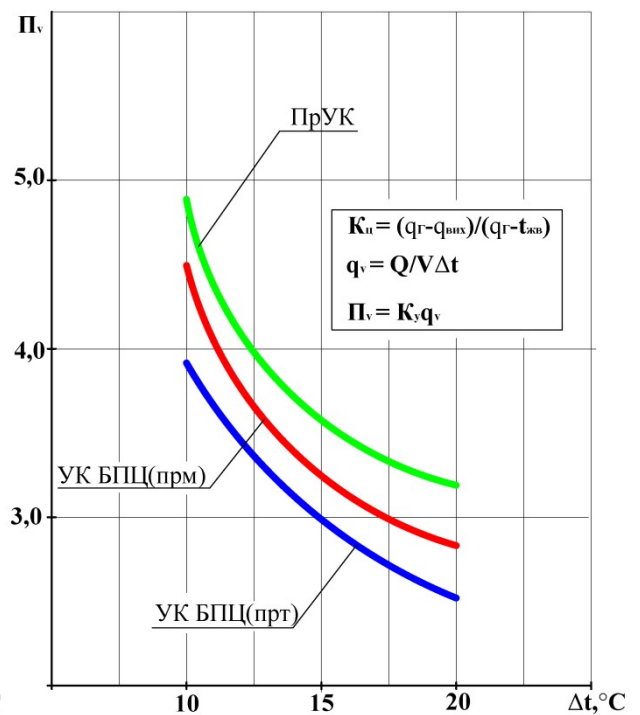


Рис. 6.17. Залежність показників Π_v різних схем УК від температурного напору Δt

6.3 Створення комплексної системи очищення газів

Необхідність виконання усіх вимог міжнародних організацій в області охорони навколишнього середовища, необхідність зменшення теплових втрат при використанні органічних палив, вартість яких зростає, підвищення економічності і надійності роботи усіх елементів КЕУ зумовили необхідність розгляду всіх можливостей виконання вказаних задач у запропонованій комплексній технології послідовно на всіх етапах: підготовки палива до використання; самого процесу горіння; процесів тепломасообміну, зниження швидкості НТК; забезпечення можливості використання не тільки явної теплоти газів, а і теплоти конденсації пари H_2SO_4 і H_2O , що містяться в димових газах; очистки газів від токсичних інгредієнтів. Це вимагає відповідної організації фізико-хімічних процесів, які забезпечать можливість виконання цих задач.

Як показали проведені нами наукові дослідження [46, 90], що пов'язані з розвитком теплових і фізико-хімічних процесів в елементах КЕУ, першорядним і вирішальним фактором для вирішення поставлених задач у винаході [135] (розробці комплексної системи зниження екологічних показників, корозії і теплових втрат, підвищення економічної ефективності, ресурсозбереження) являється організація процесу використання в паливоспалюючих агрегатах КЕУ ВПЕ (на основі сірчистих палив) з водомісткістю біля 30 %, що забезпечує необхідну енергію мікрровибухів крапель ВПЕ і відповідну турбулентність в факелі палива, що згоряє, внаслідок чого зменшується концентрація твердих часток і знижується забруднення поверхонь нагріву.

При використанні такого складу ВПЕ на виході із зони горіння внаслідок автоматичного (природного) проходження фізико-хімічних процесів у складі димових газів з'являється суміш оксидів азоту з співвідношенням компонентів $\text{NO}_2 : \text{NO}$ близького до еквімолярного співвідношення 0,35...0,5, при якому при температурах поверхні нижче температури точки роси пари H_2SO_4 має місце найбільш інтенсивна абсорбція конденсатом сірчаної кислоти оксидів азоту. Це

забезпечує появу пасивної плівки на поверхні металу і внаслідок цього різке зниження НТК до рівня 0,15 мм/рік при горінні ВПЕ з надлишком повітря α до 1,45 (при відсутності кислотного «піку») в межах температури поверхні металу 140...70 °С. Це явище захищено одержаним нами патентом [134]. В зв'язку з цим з'являється можливість не тільки забезпечити зниження швидкості НТК, але й інтенсифікувати абсорбцію NO_x і SO_2 , бо природно (автоматично) при $t_{\text{ст}} = 110$ °С складається концентрація сірчаної кислоти на рівні 57 %, при якій різко зростає абсорбція SO_2 [11, 122]. Крім того, в зв'язку з різким зменшенням інтенсивності НТК можливо знизити температуру газів на виході з котла до рівня 80...90 °С, що суттєво зменшує втрату теплоти з відхідними газами із котлів (звичайно ця температура знаходиться на рівні 150...170 °С). Відсутність «піку» НТК забезпечує надійність і більшу довговічність роботи НТПН при перемінних режимах роботи паливоспалюючих установок.

На основі рішення вказаних задач пропонується схема установки, яка забезпечує енергоресурсозбереження, очищення газів, надійність і довговічність конденсаційних НТПН УК при використанні ВПЕ на основі сірчистих палив (рис. 6.18).

Необхідний рівень кінцевих екологічних показників роботи ДГ, формується впродовж всього технологічного тракту, починаючи від підготовки палива необхідної якості. Цей рівень обумовлюється насамперед умовами використання палива в камері згоряння ДГ (ДВЗ або ГТД). Тому важливим фактором являється якість і стан води, що використовується як для приготування ВПЕ, так і для проведення інтенсивної абсорбції NO_x , SO_2 , CO_2 в конденсаційних поверхнях УК, а потім і в скруберах (рис. 6.19).

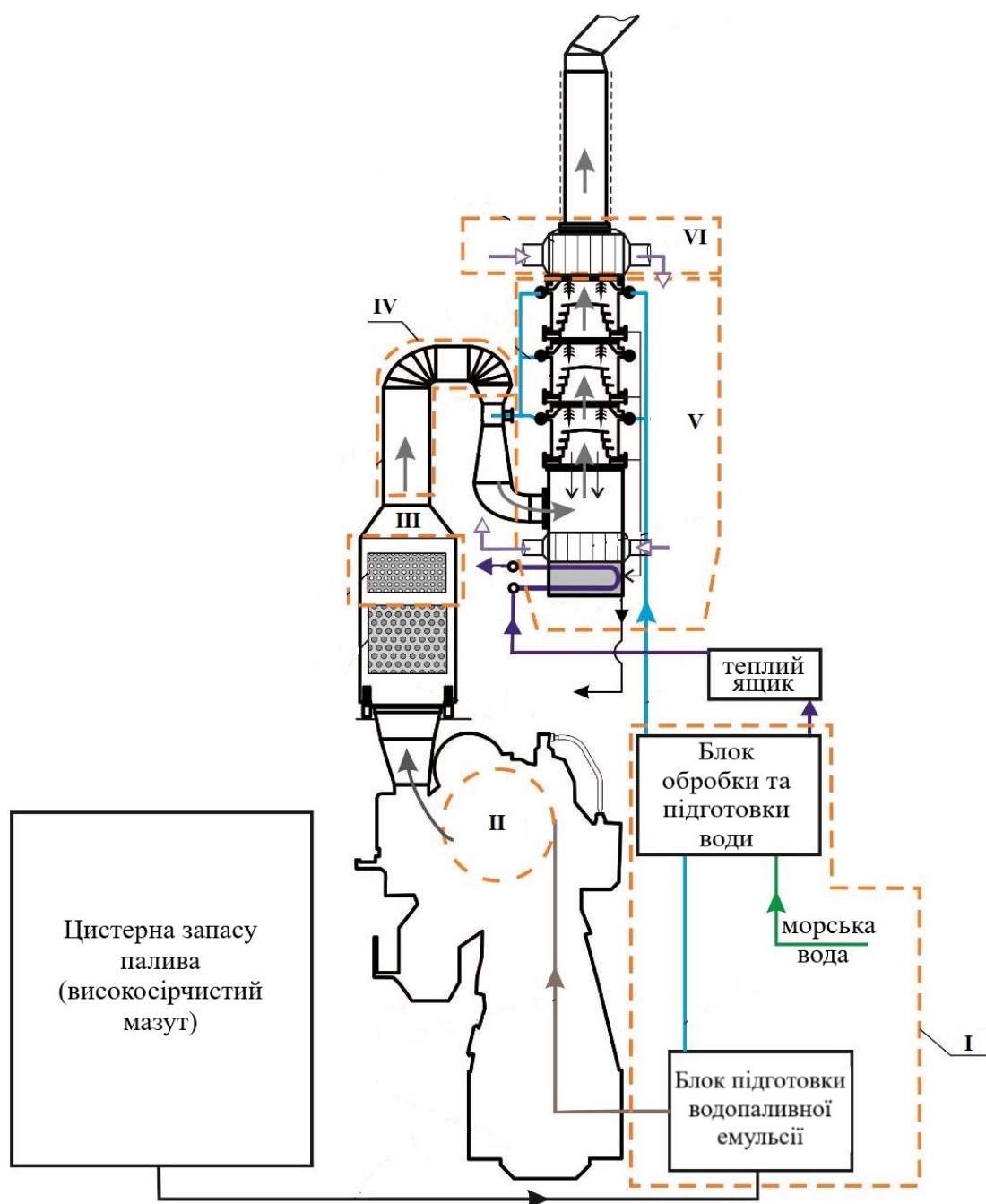


Рис. 6.18. Схема установки для комплексного способу очищення газів

I - кавітаційна обробка води перед електродіалізною установкою та кавітаційна обробка водопаливної емульсії; II - зменшення концентрації токсичних інгредієнтів та твердих часток в газах при спаленні водопаливної емульсії з водовмістом 30 % (1-й етап очищення газів); III - процеси адсорбції, що протікають на конденсаційних конвективних поверхнях утилізаційного та допоміжного котлів; IV - процеси, що протікають на конденсаційних поверхнях газоходів; V - скруберна технологія очищення газів; VI - підсушка газів

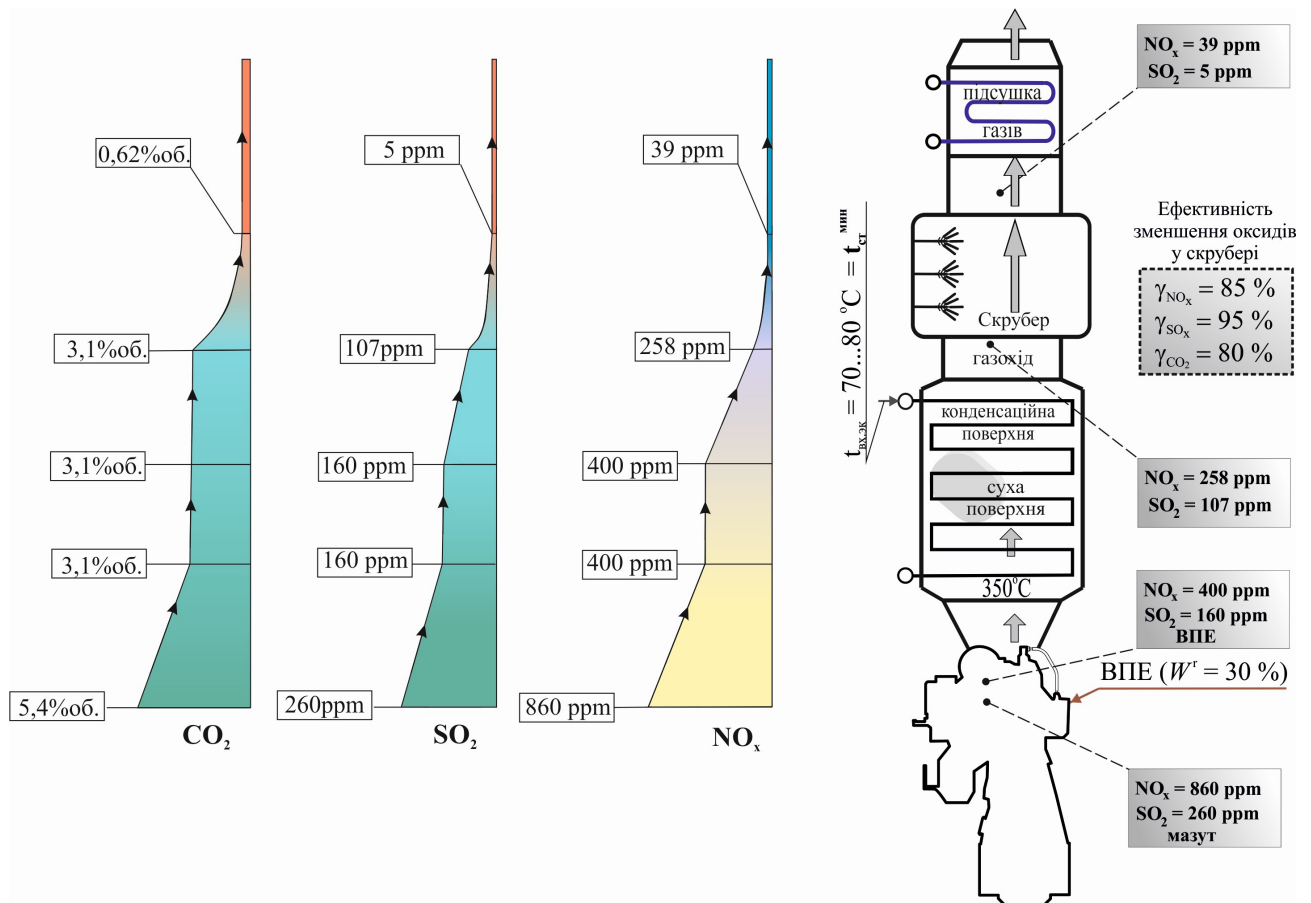


Рис. 6.19. Зниження викидів шкідливих речовин при використанні ВПЕ при застосуванні скрубберної технології

Як видно, використання конденсаційної поверхні нагріву дозволяє суттєво знизити концентрацію оксидів азоту і сірки – на 65 %.

Висновки по розділу 6

1. Розрахунки теплових діаграм указаних схем УК показують, що за рахунок можливості знизити значення $\vartheta_{\text{вих}}$ за УК з 160 °C до 90 °C при використанні ВПЕ з W^r до 30 % теплові потужності УК зростають на 25 %.

2. При прямотечійній схемі котла відсутні сепаратори пари, циркуляційні насоси, капітальні витрати на які складають половину (а то і більше) вартості поверхонь нагріву котлів, що вказує на доцільність їх використання.

3. Розрахунки різних схем УК показали зростання ККД КЕУ при допалюванні додаткового палива до 10 % від витрати палива на привідний двигун.

4. Результати розрахунків показали, що у разі застосування водопаливної емульсії з водовмістом $W^r = 30\%$ і конденсаційної поверхні нагріву має місце зниження концентрації оксидів азоту і сірки на 65 %.

Результати досліджень в розділі з даної дисертаційної роботи знайшли своє відображення в наступних публікаціях автора [50, 44, 39, 47, 43, 51, 88, 95, 135].

ВИСНОВКИ

1. Встановлено, що у разі використання водопаливної емульсії з водовмістом 30 % при температурах стінки $t_{\text{ст}}$ нижче температури точки роси пари сірчаної кислоти $t_{\text{р H}_2\text{SO}_4}$ і значеннях коефіцієнта надлишку повітря α від 1,5 до 3,0 та вмісті сірки у вихідному паливі до 2 % інтенсивність низькотемпературної корозії в 3,3 рази нижче, ніж при застосуванні палива з водовмістом 2 %.

2. Отримані залежності швидкості корозії від температури стінки $t_{\text{ст}}$ при використанні водопаливної емульсії з водовмістом 30 % і дії потоку газів упродовж $\tau = 1000$ годин показали, що в межах температур стінки $t_{\text{ст}}$ від 140 до 70 °C швидкість низькотемпературної корозії нижче допустимого рівня 0,25 мм/рік, що дозволяє знизити температуру відхідних газів до 90 °C і збільшити глибину утилізації відхідних газів на 20 %.

3. В результаті проведених теоретичних досліджень встановлено, що пористість забруднень на конденсаційних низькотемпературних поверхнях нагріву при застосуванні водопаливної емульсії становить 0,48, мазуту – 0,3, а для сухих поверхонь пористість становить: при використанні водопаливної емульсії – 0,9, а мазуту – 0,7.

4. Отримані залежності коефіцієнта забруднення від температури стінки $\epsilon_3 = f(t_{\text{ст}})$ низькотемпературних поверхонь нагріву при застосуванні рідкого палива і водопаливної емульсії та дії потоку газів упродовж $\tau = 1000$ годин дозволяють визначати межі значень температури стінки $t_{\text{ст}}$ для сухої ($t_{\text{ст}} = 210 \dots 140$ °C), перехідної ($t_{\text{ст}} = 140 \dots 120$ °C) і конденсаційної зони ($t_{\text{ст}} = 120 \dots 70$ °C).

5. Встановлено, що для сухих поверхонь нагріву при використанні водопаливної емульсії з водовмістом 30 % і дії потоку газів упродовж $\tau = 1000$ годин та температурах стінки $t_{\text{ст}}$ більше 130 °C коефіцієнти забруднення ϵ_3 приблизно в 2,5 рази нижче, ніж для мазуту з водовмістом 2 %.

6. Показано, що для конденсаційних поверхонь нагріву при використанні водопаливної емульсії з водовмістом $W^r = 30\%$ коефіцієнти забруднення ϵ_3 майже в 10 разів вищі порівняно з сухими поверхнями.

7. На основі проведених досліджень кінетики забруднення встановлено, що у разі використання водопаливної емульсії для отримання високих значень коефіцієнтів теплопередачі k_3 , теплової ефективності ζ конденсаційних поверхонь рекомендується зменшити періодичність між очищеннями до 8 годин (для сухих поверхонь нагріву при температурах стінки $t_{ст}$ вище 140°C періодичність очищення становить 2500...3000 годин).

8. Результати розрахунків показали, що у разі застосування водопаливної емульсії з водовмістом $W^r = 30\%$ і конденсаційної поверхні нагріву теплова потужність утилізаційного котла зростає на 25 % порівняно з використанням мазуту при одночасному зниженні концентрації оксидів азоту і сірки на 65 %.

9. Розроблена методика визначення залежності питомої втрати маси металу ΔG_k і питомої маси забруднення ΔG_3 з використанням кореляційних рівнянь, отриманих при менших значеннях коефіцієнта надлишку повітря $\alpha \approx 1,5$, забезпечує прийнятну достовірність даних (в межах 5 %) і при більш високих значеннях коефіцієнта надлишку повітря $\alpha = 1,5...3,0$.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Andreassen A., Nyggard K. B. Water - in – fuel emulsion as marine engine fuel for reduced NOx and particulate emission: URL: <http://www2.mst.dk/udgiv/publications/2011/08/978-87-92779-30-4.pdf> (дата обращения : 04.09.2013). – The Danish Environmental Protection Agency (Environmental Project No. 1380). - 2011. - ISBN 978-87-92779-30-4. - 75 p.

2. Ecospec CSNOx TM Brochure: URL: http://www.ecospec.com/upload/brochurepdf/67_uaez4cere8bt2axql5896mgz76wsbasv.pdf (дата обращения : 04.09.2013);

3. Landet, R.D. P Memission sand NOx – reduction due to water in fuel emulsions in marine diesel engines: Norwegian University of Science and Technology, Department of Marine Technology, Student thesis. - 2010. - в 73 г.: URL: <http://ntnu.diva-portal.org/smash/get/diva2:375078/FULLTEXT01> (дата обращения : 04.09.2013);

4. Pure SOx Exhaust gas cleaning (EMD00281EN 1208): URL: <http://www.alfalaval.com/industries/marine/oiltreatment/Documents/PureSOx%20product%20brochure.pdf> (дата обращения: 04.03.2013).

5. Skeltved, O. CIMAC NMA (Norway 27/01/2010): URL: <http://sintef.net/upload/MARINTEK/CIMAC2010/MAN%20Ole%20Skeltved.pdf> (дата обращения: 04.09.2013). - MANDiesel©. 2010. 48 p.

6. Авраменко А.А. Апробація ренормгрупової моделі нестационарної турбулентності. Доповіді Національної академії наук України. 2011. №5. С.88-93.

7. Акимов А.В. Влияние конденсации паров на низкотемпературных поверхностях нагрева котлов на их экологические показатели. Наукові праці. Науково-методичний журнал. Т.61. Вип. 48. Техногенна безпека. – Миколаїв: Вид-во МДТУ ім. П.Могили, 2007. С.116-125.

8. Акимов А.В. Загрязнение поверхностей нагрева котлов и экологические показатели при сжигании водотопливной эмульсии. Наукові

праці. Науково-методичний журнал. Т.73. Вип. 60. Техногенна безпека. Миколаїв: Вид-во МДТУ ім. П.Могили, 2007. С.116-125.

9. Акимов А.В. Повышение экологической безопасности котлов путем сжигания водомазутных эмульсий. Збірник наукових праць. Обладнання та технології харчових виробництв. 2009. №21. С.3–8.

10. Алексеев А.П., Кудряшов Г.Ф., Чекменев Е.Е. Дизельные и карбюраторные электроагрегаты и станции: справочник / под ред. В.А. Андрейкова. Москва: Машиностроение, 1973.

11. Амелин А.Г. Производство серной кислоты. Москва: Химия, 1967. 472 с.

12. Арсеньев Л.В., Тырышкин В.Г. Комбинированные установки с газовыми турбинами. Ленинград: Машиностроение, 1982.

13. Басок Б.И., Коломейко Д.А., Кужель Л.М. Энергетические и экологические показатели когенерационной установки электрической мощностью 1,0 МВт и тепловой мощностью 1,2 МВт. Промышленная теплотехника. 2009. Т.31. №2. С.42-49.

14. Басок Б.И., Коломейко Д.А. Анализ когенерационных установок. Часть II. Анализ энергетической эффективности. Промышленная теплотехника. 2006. Т.28. №4. С.79-83.

15. Басок Б.И., Базеев Е.Т., Диденко В.М., Коломейко Д.А. Анализ когенерационных установок. Часть I Классификация и основные показатели. Промышленная теплотехника. 2006. Т.28. №3. С.83-89.

16. Боровков В.М., Османова Н.М. Определение максимальной мощности парогазовой установки с использованием дожигания топлива в газоходе перед котлом-утилизатором. Теплоэнергетика. 2011. №1. С.70-71.

17. Боровков В.М., Романова Н.М. Повышение эффективности ПГУ-450Т с котлами-утилизаторами путем дожигания топлива в топочной камере. Промышленная энергетика. 2009. №6. С.29-32.

18. Бузник В.М. Теплопередача в судовых энергетических установках. Ленинград: Судостроение, 1967. 376 с.

19. Булах К.Г. Исследование пульсационного сжигания мазута в малогабаритной топке судового парогенератора: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.224. Одесса, 1971.
20. Валуева Е.П. Пульсирующее турбулентное течение в трубах. Часть 1. Течение несжимаемой жидкости. Вестник МЭИ. 2006. №5. С.121-130.
21. Валуева Е.П., Попов В.Н. Особенности гидродинамического сопротивления при турбулентном пульсирующем течении жидкости в круглой трубе. Изв. АН СССР. Энергетика. 1994. №2. С.122-131.
22. Внуков А.К. Теплохимические процессы в газовом тракте паровых котлов. Москва: Энергоиздат, 1981. 296 с.
23. Возницкий И.В., Пунда А.С. Судовые двигатели внутреннего сгорания, Том 2. Москва: Моркнига, 2008. 470 с.
24. Волков А.А., Романов В.А., Щербинкин В.И. Исследование теплопроводности отложений на низкотемпературной поверхности утилизационного котла. Судостроение. 1986. №7. С.22-23.
25. Воржев Ю.И., Гимбутис К.К. Об использовании водотопливных эмульсий в судовых дизельных установках. Судостроение. 1985. №7. С.18-22.
26. Воропаев Г.А., Воскобойник А.В., Воскобойник В.А. и др. Источники псевдозвуковых пульсаций давления при обтекании сферической лунки. Акустичний вісник. 2008. Т.11. №3. С.27-48.
27. Выбросы загрязняющих веществ в атмосферу от энергетических установок. Методика определения. ГКЛ 34.02.305-2002. Минтопэнерго Украины. Киев, 2002.
28. Гаврилов А.Ф. Уменьшение вредных выбросов при очистке паровых котлов. Москва: Энергоатомиздат, 1990. 240 с.
29. Гаврилов А.Ф., Зегер К.Е., Маринин В.К. и др. Золовой занос низкотемпературной поверхности при сжигании сернистого мазута с присадкой хлористого магния. Теплоэнергетика. 1974. №10. С.31-33.
30. Гаврилов А.Ф., Малкин Б.М. Загрязнение и очистка поверхностей нагрева котельных установок. Москва: Энергия, 1980. 328 с.

31. Галицейский Б.М., Рыжов Ю.А., Якуш Е.В. Тепловые и гидродинамические процессы в колеблющихся потоках. Москва: «Машиностроение», 1977. 256 с.

32. Гапоненко А.М., Чернин Р.А., Репин А.А. Расчетные исследования когенерационной установки для паровых котельных. Энергосбережение и водоподготовка. 2006. №2. С.71-72.

33. Геллер И. Мазут как топливо. Москва: Недра, 1965.

34. Горбов В.М. Энциклопедия судовой энергетики: учебник. Николаев: НУК, 2010. 624 с.

35. Горбов В.М., Горячкин А.В. Исследование интенсивности коррозионных процессов при сжигании водомазутных эмульсий. 36. наукових праць УДМТУ. №5 (391). Миколаїв: УДМТУ. 2003. С.87-95.

36. Горячкин А.В. Влияние содержания влаги в зоне горения на эмиссию оксидов азота и серы. Наук. праці: Науково-методичний журнал. Т.31. Вип.18. Техногенна безпека. Миколаїв: Вид-во МДГУ ім.П.Могили, 2004. С. 27-38.

37. Горячкин А.В. Влияние содержания влаги в зоне горения на эмиссию оксидов азота и серы. Наук. праці: Науково-методичний журнал. Т.30. Вип.19. Техногенна безпека. Миколаїв: Вид-во МДГУ ім.П.Могили, 2006. С. 29-38.

38. Горячкин В.Ю. Исследование коррозионных процессов при сжигании сернистых мазутов с минимальными коэффициентами воздуха: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Одесса: ОПИ, 1969. 20 с.

39. Горячкин В.Ю., Горячкин А.В., Корниенко В.С. Эффективность утилизации теплоты ДВС при дожиге топлива перед УК. Інновації в суднобудуванні та океанотехніці: матеріали III Міжнародної науково-технічної конференції. Миколаїв: НУК, 2012. С.256–257.

40. Горячкин В.Ю., Андреев А.А., Корниенко В.С. Влияние загрязнения конденсационных поверхностей нагрева на интенсивность теплопередачи. Всеукраїнська науково-практична конференція молодих учених, спеціалістів, аспірантів «Проблеми енергоресурсозбереження в промисловому регіоні.

Наука і практика»: 36. тездоповідей. Маріуполь: ДВНЗ «ПДТУ», 2017. С.100-102.

41. Горячкин В.Ю., Андреев А.А., Корниенко В.С. Возможности применения конденсационных поверхностей нагрева при сжигании сернистых водотопливных эмульсий. Суднова енергетика: стан та проблеми: матеріали VIII Міжнародної науко-технічної конференції. Миколаїв: НУК, 2017. С.359-363.

42. Горячкин В.Ю., Андреев А.А., Корниенко В.С. Загрязнение конденсационных поверхностей нагрева утилизационных котлов при сжигании водомазутных эмульсий. Іновації в суднобудуванні та океанотехніці: матеріали Міжнародної науково-технічної конференції. Миколаїв: НУК, 2016. С.136-137.

43. Горячкин В.Ю., Андреев А.А., Корниенко В.С. Когенерационные установки с ДВС. Муніципальна енергетика: проблеми, рішення: матеріали IV Міжнародної науково-технічної конференції. Миколаїв: НУК, 2011. С.194-197.

44. Горячкин В.Ю., Андреев А.А., Корниенко В.С. Улучшение экологических показателей при установке конденсационных поверхностей в утилизационных котлах. Іновації в суднобудуванні та океанотехніці: матеріали Міжнародної науково-технічної конференції. Миколаїв: НУК, 2016. С.281-282.

45. Горячкин В.Ю., Горячкин А.В., Новиков В.И., Корниенко В.С. Исследования кинетики низкотемпературной коррозии и загрязнения поверхностей нагрева УК. Іновації в суднобудуванні та океанотехніці: Матеріали III Міжнародної науково-технічної конференції. Миколаїв: НУК, 2012. С. 280–281.

46. Горячкин В.Ю., Корниенко В.С. Интенсивность коррозионных процессов в утилизационных котлах при сжигании водотопливных эмульсий. Вестник Астраханского государственного технического университета. Сер.: Морская техника и технология. 2013. №2. С.101–110.

47. Горячкин В.Ю., Корниенко В.С. Эффективность энергосбережения при сжигании сернистых водотопливных эмульсий. Іновації в суднобудуванні

та океанотехніці: матеріали Міжнародної науково-технічної конференції. Миколаїв: НУК, 2017. С.198-199.

48. Горячкін А.В. Підвищення ефективності суднових котлів при використанні водопаливних емульсій: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.08.05. Миколаїв, 2007. 20 с.

49. Горячкін В.Ю., Горячкін А.В., Іутінський В.О., Корнієнко В.С. Ефективний спосіб захисту металу низькотемпературних поверхонь нагріву котла від сірчаноокислотної корозії. Інновації в суднобудуванні та океанотехніці: матеріали III Міжнародної науково-технічної конференції. Миколаїв: НУК, 2012. С. 253–255.

50. Горячкін В.Ю., Андреев А.А., Корнієнко В.С. Ефективність допалювання водопаливних емульсій перед утилізаційними котлами. Сучасні інформаційні і іноваційні технології на транспорті: матеріали Міжнародної науково-практичної конференції. Херсон: ХДМІ, 2017. С. 67-69.

51. Горячкін В.Ю., Горячкін А.В., Іутінський В.О., Кондя В.С. Підвищення ефективності утилізації теплоти сучасних дизельних енергетичних установок. Сучасні інформаційні і іноваційні технології на транспорті: матеріали Міжнародної науково-практичної конференції. Том2. Херсон: ХДМІ, 2010. С. 193–196.

52. Гринкгут М.С. Выбор типов дизель-генераторов на дизельных электростанциях из условия минимального годового расхода топлива. Теплоэнергетика. 2009. №11. С.18-21.

53. Гуревич А.М., Зинин В.И., Колесниченко А.Г., Нагибин А.Я., Пильдиш В.Г. Особенности утилизационного прямоточного котла для судовой комбинированной газопаротурбинной установки. Судостроение. 1984. №4. С.22-24.

54. Гусаров А.В., Ковалев Е.П. Эффективная теплопроводность свободно насыпанных и слабоспеченных порошков. I Модель. Физика и химия обработки материалов. 2009. № 1. С. 70-82.

55. Давидсон В.В., Елисеев В.И., Толстопят А.П., Толстопят П.А. Сжигание водомазутных эмульсий в тепловых агрегатах. Материалы 4-го Минского междунар. форума по тепломассообмену. Т.10. 2000. С.405-412.

56. Давлетшин И.А., Душина О.А., Занько Ф.С., Михеев Н.И., Молочников В.М. Турбулентный отрыв потока и характеристики теплообмена в условиях гидродинамической нестационарности. Изв. РАН. Энергетика. 2011. №1. С.56-69.

57. Давлетшин И.А., Михеев Н.И. Структура течения и теплообмен при отрыве пульсирующего потока. Теплофизика высоких температур. 2012. №3. С.442-449.

58. Давлетшин И.А., Михеев Н.И. Отрывная область при обтекании препятствия пульсирующим потоком в канале. Изв. РАН. МЖГ. 2010. №5. С.85-90.

59. Давлетшин И.А., Михеев Н.И., Молочников В.М. Отрыв пульсирующего потока. Доклады Академии наук. 2007. Т.417. №6. С.760-763.

60. Давлетшин И.А., Михеев Н.И., Молочников В.М. Теплообмен в турбулентной отрывной области при наложенных пульсациях потока. Теплофизика и аэромеханика. 2008. Т.15. №2. С.229-236.

61. Джулий А.В., Зайченко В.М., Марков А.В. Теплоутилизационный блок мини-ТЭЦ на базе ДВС. Промышленная теплотехника. 2006. Т.28. №3. С.83-89.

62. Директор Л.Б., Зайченко В.М., Марков А.В., Суслов В.А. Результаты стендовых испытаний газопоршневой мини-ТЭЦ на базе двигателя ЯМЗ-240. Теплоэнергетика. 2008. №11. С.64-66.

63. Директор Л.Б., Майков И.Л., Иванов О.А. Задача оптимизации автономных энергетических комплексов в составе локальных распределительных сетей. Энерготехнологии и ресурсосбережение. 2012. №4. С.33-41.

64. Долганов К.Е., Поляков А.П. Аппроксимирующие уравнения характеристик токсичности отработавших газов газодизеля. Экотехнологии и ресурсосбережение. 1997. №4. С.52-55.

65. Долганов К.Е., Поляков А.П. Методика аппроксимации характеристик дымности отработавших газов дизелей. Экотехнологии и ресурсосбережение. 1997. №2. С.47–50.

66. Долинский А.А., Басок Б.И. Дискретно-импульсная трансформация энергии в адиабатно вскипающем потоке. Промышленная теплотехника. 2001. Т.23. №4-5. С. 5-20.

67. Долинский А.А., Басок Б.И., Коломейко Д.А. Эффективность когенерационных тепловых схем. Наукові праці. Т.61. №48. С.30-38.

68. Долинский А.А., Басок Б.И., Базеев Є.Т. Стратегія теплозабезпечення населених пунктів України. До обговорення проектів енергетичної стратегії України на період до 2020, 2030 та 2035 року. Вісник НАН України. 2015. №4. С.98-105.

69. Долинский А.А., Клименко В.Н., Сабашук П.П. Условия эффективного применения дополнительного сжигания топлива в ПГУ. Экотехнологии и ресурсосбережение. 2003. №2. С.8-13.

70. Долинський А.А., Басок Б.І., Базеев Е.Т., Пироженко І.А. Комунальна теплоенергетика України: стан, проблеми, шляхи модернізації: колективна монографія. Київ, 2007. Т. 1-2. 828 с.

71. Дрейцер Г.А. О влиянии гидродинамической нестационарности на коэффициенты теплоотдачи и гидравлического сопротивления при турбулентном течении теплоносителя в трубе. Труды XIV Школы-семинара молодых ученых и специалистов под рук. акад. РАН А.И. Леонтьева. 26-30 мая 2003г. Рыбинск. Т.1. С.7-12.

72. Ежов В.С., Кормилицын В.И. Механизм процессов окисления оксидов азота при синхронной очистке и утилизации газообразных выбросов. Энергосбережение и водоподготовка. 2008. №3. С.68-70.

73. Ежов В.С., Кормилицын В.И. Механизм процессов поглощения оксидов азота при синхронной очистке и утилизации газообразных выбросов. Энергосбережение и водоподготовка. 2008. №6. С.65-69.

74. Епифанов П.А., Карпова И.Е., Патраков Ю.М. Содержание сажи в отработавших газах энергетических установок и способы его контроля и снижения. Судостроение. 2006. №3. С.38-39.

75. Желудков Д.Н., небеснов В.В., Худов Н.И. Использование водотопливных эмульсий в дизелях. Экспресс-информация, серия “Техническая эксплуатация флота”, вып.14 (498). М.: Морской транспорт. 1980. С.11-13.

76. Закон України Про комбіноване виробництво теплової та електричної енергії (когенерацію) та використання скидного енергопотенціалу. Відомості Верховної Ради. 2005. № 20. С. 278 – 285.

77. Захаренков А.В., Преснов Г.В., Бублей П.В. и др. Образование и сжигание тонкодисперсных водомазутных суспензий на ТЭЦ-26 Мосэнерго. Электр. станции. 2004. №3. С.19-21.

78. Захаров Ю.В., Андреев Л.М. Оборудование судовых систем кондиционирования. Ленинград: Судостроение, 1971.

79. Зимон А.Д. Адгезия пыли и порошков. Москва: «Химия», 1976. 288 с.

80. Канило П.М., Соловей В.В., Костюк В.Е., Костенко К.В. Угльно-водородные парогазовые комплексы с дополнительным производством синтетических топлив. Проблемы машиностроения. 2009. Т.12. №4. С.64-72.

81. Кириллов И.И., Зысин В.А., Ошеров С.Я. Выбор оптимальных параметров высокотемпературной газопаровой установки по схеме ЦКТИ-ЛПИ. Теплоэнергетика. 1967. №1. С.44-47.

82. Клименко В.Н. Проблемы когенерационных технологий в Украине. Промышленная теплотехника. 2001. Т.23. №4-5. С.106-110.

83. Клименко В.Н., Мазур А.И., Сабашук П.П. Когенерационные системы с тепловыми двигателями: справочное пособие. Киев, 2008. 560 с.

84. Клименко В.Н., Сабашук П.П., Мазур А.И., Клименко Ю.Г. Влияние экономичности ГТУ на эффективность дополнительного сжигания топлива в парогазовых установках. Пром. теплотехника. 2002. Т.22. №2. С.57-62.

85. Коломейко Д.А., Корнеев И.Ю. Анализ энергетической эффективности когенерационной установки фирмы "WILSON" типа PG1250B. Промышленная теплотехника. 2005. Т.27. №3. С.46-49.

86. Колпаков С.П. Использование топливных суспензий в судовых паровых котлах. Судостроение. 2001. №32. С.32-36.

87. Колчин С.А. Гидравлическое сопротивление дискретно-шероховатого канала при наложенных пульсациях потока: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 01.02.05. Казань, 2015.

88. Корниенко В.С. Возможности комплексной утилизации теплоты судовых ДВС. Всеукраїнський форум молодих науковців "Макаровські читання". Миколаїв: НУК, 2012 р. С. 23–24.

89. Корниенко В.С. Интенсивность процессов загрязнения поверхностей нагрева утилизационных котлов при сжигании водомазутных эмульсий. Авиационно-космическая техника и технология. 2017. №1 (136). С.48–53.

90. Корниенко В.С. Исследование динамики низкотемпературной коррозии и загрязнения поверхностей нагрева утилизационных котлов. Рибне господарство України. 2013. №3(86). С.62–65.

91. Корниенко В.С. Исследование работы ротационных форсунок. Авиационно-космическая техника и технология. 2013. № 8 (105). С. 142–146.

92. Корниенко В.С., Радченко А.Н., Андреев А.А., Ю.Г. Щербак. Влияние загрязнения на тепловую эффективность поверхностей нагрева утилизационных котлов при использовании водотопливных эмульсий на основе маловязких топлив. Авиационно-космическая техника и технология. 2018. № 2 (146). С. 28 – 32.

93. Корнієнко В.С. Вплив забруднення поверхонь нагрівання на інтенсивність теплопередачі в утилізаційних котлах при використанні водопаливних емульсій. Вісник Приазовського державного технічного університету. Сер.: Технічні науки. 2017. вип.35. С. 78–86.

94. Корнієнко В.С. Інтенсивність низькотемпературної корозії в утилізаційних котлах при спалюванні водопаливних емульсій. Всеукраїнський

форум молодих науковців "Макаровські читання". Миколаїв: НУК, 2013. С. 12-13.

95. Корнієнко В.С. Підвищення ефективності утилізації теплоти вихлопних газів ДВЗ при спалюванні водомазутних емульсій і при використанні судових прямоточних котлів. Інновації в суднобудуванні та океанотехніці: Матеріали II Міжнародної науково-технічної конференції. Миколаїв: НУК, 2011. С. 200–203.

96. Корягин В.А. Сжигание водотопливных эмульсий и снижение вредных выбросов. С.-Петербург: Недра, 1995. 304 с.

97. Корягин В.А., Шевелев К.В., Батуев С.П. Исследование содержания вредных веществ в продуктах сгорания водомазутных эмульсий. Промышленная энергетика. 1988. №4. С.45-48.

98. Кошкин В.К., Калинин Э.К., Дрейцер Г.А., Ярхо С.А. Нестационарный теплообмен. Москва: «Машиностроение», 1973. 328 с.

99. Кубанский П.Н. Влияние акустических колебаний на пограничный слой. ЖТФ. 1952. Т.22. вып. 4. С.71-79.

100. Кубанский П.Н. Влияние акустических течений на процесс конвективного теплообмена. Акустический журнал АН СССР. 1959. Т.5. вып.1. С.59-61.

101. Кубанский П.Н. Течение у нагретого твердого тела в стоячей акустической волне. ЖТФ. 1952. Т.22. вып. 4. С.326-328.

102. Кудряш А.П., Перерва П.Я., Киреева В.Н., Потапенко А.А. Экологическое совершенствование дизелей путем использования водотопливных эмульсий. Двигатели внутреннего сгорания. 2004. №2. С.6-9.

103. Кузнецов Н.В. Рабочие процессы и вопросы усовершенствования конвективных поверхностей котельных агрегатов. Ленинград: Госэнергоиздат, 1957. 174 с.

104. Лавров Н.В., Розенфельд Э.И., Хаустович Г.П. Процессы горения топлива и защита окружающей среды. Москва: «Металлургия», 1981. 240 с.

105. Леонтьев А.К. О "конденсационной" методике анализа влагосодержания генераторных газов. Теплоэнергетика. №4. 1993. С.49-29.
106. Литаврин О.Г. Утилизация тепла отработавших газов газотурбинных двигателей при температуре поверхности теплообменных аппаратов ниже «точки росы». Судостроение. 2003. №1. С.26-30.
107. Лозицкий Н.Г., Котлер В.Р. Использование горелок с ротационной форсункой для сжигания мазута с присадкой воды. Промышленная энергетика. 2002. №3. С.37-40.
108. Лыков А.В. Тепломассообмен: справочник. Москва: Энергия, 1978. 480 с.
109. Магадеев В.Ш. Коррозия газового тракта котельных установок. Москва: Энергоатомиздат, 1986. 272 с.
110. Майданик М.Н. Исследование некоторых закономерностей образования низкотемпературных отложений золы сернистых мазутов. Теплоэнергетика. 1980. №4. С.58-60.
111. Маслов В.В. Современные методы снижения содержания вредных веществ в отработанных газах судовых дизелей. Судостроение. 1995. №8, №9 С.20-24.
112. Минько К.Б., Артемов В.И., Яньков Г.Г. Гидравлическое сопротивление и эффективная теплопроводность засыпок из сферических частиц. Вестник МЭИ. 2011. №4. С.47-55.
113. Михеев Н.И., Давлетшин И.А., Молочников В.М. Теплообмен при отрыве пульсирующего потока. Тепловые процессы в технике. 2009. Т.1. №8. С.314-317.
114. Ольховский Г.Г., Чернецкий Н.С., Святков В.А., Трушин С.Г. Перспективные ПГУ для крупных электростанций. Теплоэнергетика. 1985. №9. С.5-12.
115. Парсаданов И.В. Теплицкий А.А., Карягин И.Н., Солодовников В.В., Кравченко С.А., Ходак П.Г. Применение водотопливной эмульсии в

автотракторном дизеле. Энергетические и экономические показатели. (Часть II). Двигатели внутреннего сгорания. 2011. №2. С.121-123.

116. Парсаданов И.В., Теплицкий А.А., Солодовников В.В., Велик С.Ю. Применение водотопливной эмульсии в автотракторном дизеле. Экологическая эффективность. (Часть I). Двигатели внутреннего сгорания. 2011. №2. С.118-120.

117. Пахомов Ю.А. Коробков Ю.П., Дмитриевский Д.В., Васильев Г.Л. Топливо и топливные системы судовых дизелей. Москва: Консульт, 2004. 496 с.

118. Промышленные теплообменные процессы и установки: учебник для вузов / А.М. Бакластов, В.А. Горбенко, О.Л. Данилов и др.; под ред. А.М. Бакластова. Москва: Энергоатомиздат, 1986. 328 с.

119. Проценко Г.В. Характер отложений на поверхностях нагрева судовых утилизационных котлов. Судостроение. 1989. №7. С.25-28.

120. Проценко Г.В., Проценко Н.П., Романов В.А., Волков А.А. Низкотемпературная коррозия теплоутилизирующих поверхностей нагрева судового вспомогательного котла. Судостроение. 1987. №10. С.20-22.

121. Радченко А.М., Андреев А.А., Корнієнко В.С. Забруднення поверхонь нагріву утилізаційних котлів при використанні водопаливних емульсій на основі малов'язких палив. Авиационно-космическая техника и технология. 2018. № 1 (145). С. 43–47.

122. Рамм В.М. Абсорбция газов: изд 2-ое, перераб. и доп. Москва: Химия, 1975. 655 с.

123. Розина Е.Ю. Концентрация энергии акустического поля при возбуждении локализованного кавитационного процесса. Физика аэродисперсных систем. 2002. №39. С. 229-239.

124. Ролинский В.Ю., Иванов В.И. Теплоотдача гладкого цилиндра в условиях свободного движения среды, возмущенной инфразвуком Труды Николаевского кораблестроительного института. 1961. №22.

125. Романов В.А. Щербинкин В.И., Дмитриев Г.И. Низкотемпературная коррозия поверхностей нагрева судового котла. Судостроение. 1976. №4. С.32-34.

126. Романов В.А., Дмитриев Г.И., Щербинкин В.И., Проценко Г.В. Коррозия и загрязнение поверхностей нагрева в продуктах сгорания ГТД. Энергомашиностроение. 1979. №8. С.22-25.

127. Романов В.А., Дмитриев Г.И., Щербинкин В.И., Проценко Г.В. Низкотемпературная коррозия и загрязнение поверхностей нагрева в продуктах сгорания ГТД. Энергомашиностроение. 1979. №8. С.22-25.

128. Романов В.А., Дмитриев Г.И., Щербинкин В.И. Загрязнение низкотемпературных поверхностей нагрева судового парогенератора и эффективность некоторых методов очистки. Энергомашиностроение. 1978. №8. С.47-52.

129. Рыжков С.В., Дымо Б.В. Компактная поверхность для судовых воздухоохладителей Труды НКИ. Николаев. 1980. №161. С.58-63.

130. Саламов А.А. Опыт применения ТЭС с дизельными и газовыми двигателями в ряде стран. Теплоэнергетика. 2007. №2. С.76-78.

131. Северянин В.С. Обдувание частицы топлива пульсирующим потоком. Известие ВУЗов. Энергетика. 1987. №8. С.66-70.

132. Сеюкова Л.П. Расчет обтекания сферы запыленным газом с учетом влияния отраженных частиц. В сб.: Газодинамика и теплообмен. Ленинград. 1982. № 7. С.202-211.

133. Сжигание топливных смесей и модернизированных мазутов (Новые технологии). Судостроение. 2004. №7-8. С.53-54.

134. Спосіб захисту металу низькотемпературних поверхонь нагріву котла від сірчаноокисlotної корозії: пат. 99408 Україна: МПК C23F 11/10, F22B 37/00, F23J 15/00 / Горячкін В.Ю., Горячкін А.В., Акімов О.В., Іутінський В.О., Корнієнко В.С.; № 201110299; заявл. 23.08.11; опубл. 10.08.12, Бюл. № 15.

135. Спосіб підготовки водопаливної емульсії для енергетичних установок, в яких спалюється сірчисте органічне паливо: пат. 115037 Україна:

МПК В01D 53/60, В01D 53/14, F02B 47/02, F02M 25/022, F23D 11/16 / Горячкін В.Ю., Горячкін А.В., Акімов О.В., Корнієнко В.С., Філіпщук О.М., Тендітний Ю.Г.; №201402318; заявл. 06.03.14; опубл. 11.09.17, Бюл. № 17.

136. Тепловой расчет котельных агрегатов (Нормативный метод) / Изд. 3-е перераб. и доп. СПб.: Изд-во НПО ЦКТИ, 1998. 256 с.

137. Терехин А.Н., Слесаренко И.В., Горланов А.В., Пчельников Д.П., Разуваев А.В. Перспективы развития автономных источников энергоснабжения на базе газопоршневых и газотурбинных двигателей. Двигателестроение. 2007. №1. С.227.

138. Терехов В.И., Нахомов М.Л., Чичиндаев А.В. Тепломассообмен в двухкомпонентном развитом турбулентном газопарокапельном потоке. ИФЖ. 2001. Т.74. №2. С.56-61.

139. Томашов Н.Д., Чернова Г.П. Пассивность и защита металлов от коррозии. Москва: Наука, 1965. 208 с.

140. Хоблер Т. Теплопередача и теплообменники / пер. с польск. Ленинград: Госхимиздат, 1961. 820 с.

141. Холл. Уменьшение загрязняющих выбросов и повышение к.п.д. промышленных котлов при сжигании водно-мазутных эмульсий. Энергетические машины и установки. №4. С.1-12.

142. Хряпченков А.С. Судовые вспомогательные и утилизационные котлы: учебное пособие. Ленинград: Судостроение, 1979. 296 с.

143. Цанев С.В., Буров В.Д., Ремезов А.Н. Газотурбинные и парогазовые установки тепловых электростанций / под ред. С.В. Цанева. 2-е изд., стереот. Москва: Издательский дом МЭИ, 2006. 584 с.

144. Чепурний М.М., Антропова О.В. Показники роботи ГТУ-ТЕЦ утилізаційного типу з додатковим використанням палива. Вісник Вінницького політехнічного інституту. 2008. №5. С.39-42.

145. Чепурний М.М., Степанов Д.В., Корженко С.С. Теплові розрахунки парогенераторів. Вінниця: ВНТУ, 2005. 154 с.

146. Чепурной М.М., Ткаченко С.Й., Корженко Е.С. Эффективность применения ГГУ-ТЭС. Энергосбережение. 2006. №10. С.24-26.

147. Черниченко В.Е., Сергеева Ю.Н. Моделирование теплоты сгорания водо-мазутной эмульсии с целью оптимизации технических процессов ее использования. Вісник КДПУ. 2006. №2 (37). Част.2. С.34-36.

148. Шевелев К.В., Корягин В.А. Влияние влажности водотопливных эмульсий на эффективность их сжигания. Промышленная энергетика. 1987. №6. С.38-40.

149. Шлихтинг, Г. Теория пограничного слоя. Изд. иностранной литературы, 1956.

150. Энциклопедия по машиностроению, гл XV, С. 406.

151. Яковлев Б.В., Гринчук А.С. Оптимизация начальных параметров и степени дожигания топлива в котлах-утилизаторах ПГУ с одним и двумя давлениями пара. Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2007. №6. С.69-77.

152. Якубовский Ю.В., Суменков В.М., Селезнев Ю.С. и др. Эксплуатация производственных котлов КВГ-34К на водотопливной эмульсии. Рыбное хозяйство. 1991. №3. С.57-60.

ДОДАТОК А

Статистична обробка експериментальних даних

A1. Планування коефіцієнта забруднення

Таблиця A1.1. Вихідні дані

	run	w	a	s	dG
1	1	130	17	16,5	10
2	1	120	2	25	8
3	1	140	30	8	10
4	1	120	30	8	23
5	1	130	17	2,20476	48
6	1	113,182	17	16,5	17
7	1	120	30	28	8
8	1	120	2	8	55
9	1	130	0	16,5	19
10	1	146,818	17	16,5	1,5
11	1	140	2	26	5
12	1	130	17	8	25
13	1	140	2	8	9
14	1	140	30	30	2
15	1	130	39,5451	16,5	3
16	1	130	17	30,7952	2

Таблиця A1.2. Analysis of Variance for dG

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
A: t_{CT}	741,667	1	741,667	12,53	0,0122
B: W^r	271,407	1	271,407	4,58	0,0760
C: w_r	1932,7	1	1932,7	32,64	0,0012
AA ($t_{CT} \cdot t_{CT}$)	4,77972	1	4,77972	0,08	0,7859
AB ($t_{CT} \cdot W^r$)	79,3914	1	79,3914	1,34	0,2909
AC ($t_{CT} \cdot w_r$)	241,017	1	241,017	4,07	0,0902
BB ($W^r \cdot W^r$)	0,0106086	1	0,0106086	0,00	0,9898
BC ($W^r \cdot w_r$)	73,1395	1	73,1395	1,24	0,3089
CC ($w_r \cdot w_r$)	213,349	1	213,349	3,60	0,1064
Total error	355,248	6	59,208		
Total (corr.)	3819,36	15			

R-squared = 90,6988 percent

R-squared (adjusted for d.f.) = 76,7469 percent

Standard Error of Est. = 7,6947

Mean absolute error = 3,9786

Durbin-Watson statistic = 1,5719 (P=0,0761)

Lag 1 residual autocorrelation = 0,1987

Таблиця А1.3. Estimated effects for ΔG_3 (Оцінені ефекти для ΔG_k)

Effect (Ефект)	Estimate (Оцінка)	Stand. Error (Стандартне відхилення)
average (середнє значення)	10,8892	5,89692
A: W^r	-14,8336	4,19114
B: α	-10,0136	4,67704
C: S^r	-22,7009	3,9733
AA ($W^r \cdot W^r$)	-1,43483	5,04997
AB ($W^r \cdot \alpha$)	6,32319	5,46059
AC ($W^r \cdot S^r$)	9,70534	4,81036
BB ($\alpha \cdot \alpha$)	0,0828697	6,19093
BC ($\alpha \cdot S^r$)	5,54418	4,98829
CC ($S^r \cdot S^r$)	9,5348	5,02292

Рівняння регресії отриманої моделі коефіцієнта забруднення:

$$\varepsilon_3 = (207,419 - 0,1797t_{\text{CT}} - 3,6845W^r - 11,3073w_{\text{T}} - 0,0072(t_{\text{CT}})^2 + 0,0226t_{\text{CT}}W^r + \\ + 0,05709t_{\text{CT}}w_{\text{T}} + 0,0002(W^r)^2 + 0,0233W^rw_{\text{T}} + 0,066(w_{\text{T}})^2) \cdot 10^{-3}$$

Результати статистичної обробки експериментальних даних, отримані за допомогою програмного комплексу Statgraphics Centurion XV приведені нижче.

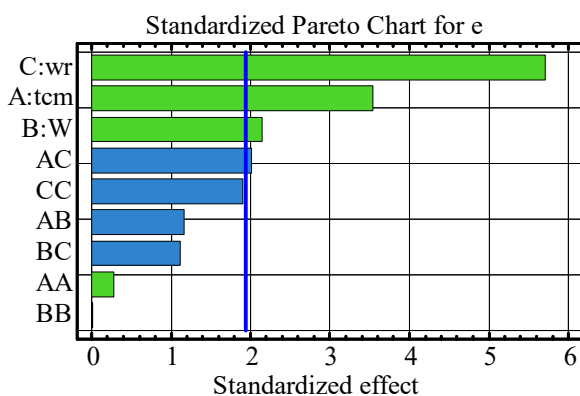


Рис. А.1.1. Карта Парето

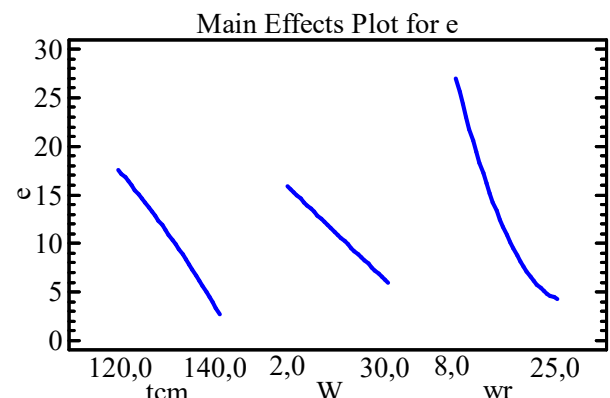


Рис. А.1.2. Графіки головних ефектів

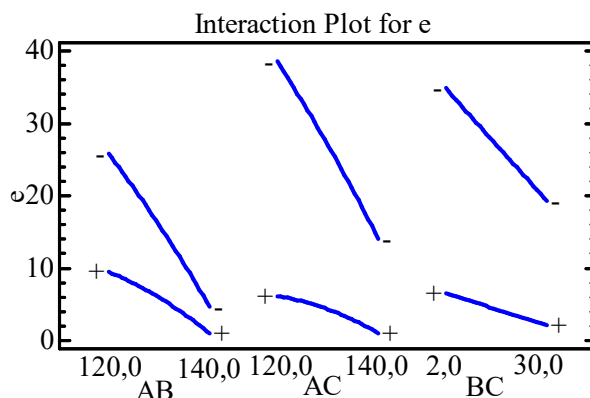


Рис. А.1.3. Графіки взаємодії параметрів

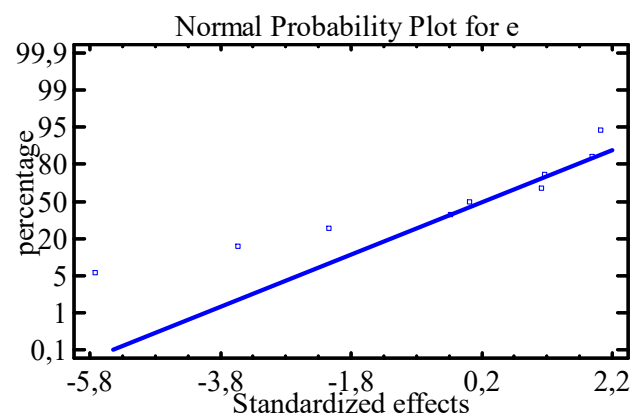


Рис.А.1.4. Графік нормального розподілу

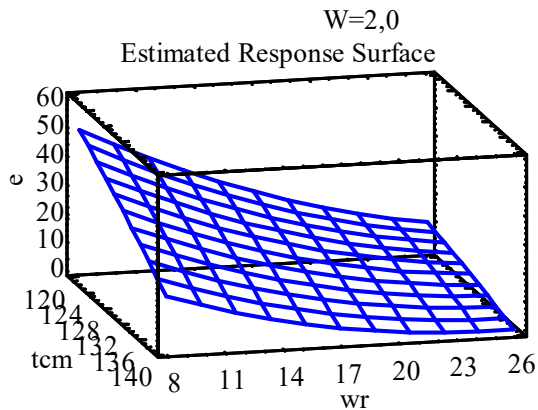


Рис. А.1.5. Тривимірна поверхня

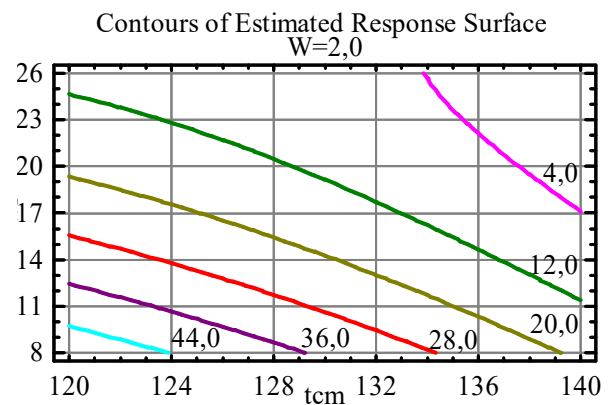


Рис. А.1.6. Контурний графік

А2. Планування експерименту низькотемпературної корозії

Таблиця А2.1. Вихідні дані

	run	w	a	s	dG
1	1	30	3,2	1	5
2	1	30	2,5	2	11
3	1	2	3,2	1	11
4	1	2	3,2	2	38
5	1	30	2,5	1	5
6	1	2	2,5	1	8
7	1	15	2,9	1,5	14
8	1	2	2,5	2	36
9	1	15	2,9	0,6	2
10	1	30	2,9	1,5	8
11	1	30	3,2	2	13
12	1	17	2,9	1,5	12
13	1	15	3,4	1,5	15
14	1	15	2,2	1,5	13
15	1	10	2,9	1,5	16
16	1	15	2,9	2,5	33

Таблиця А2.2. Analysis of Variance for dG

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
A: W^r	479,632	1	479,632	467,86	0,0000
B: α	7,95515	1	7,95515	7,76	0,0318
C: S^r	988,187	1	988,187	963,93	0,0000
AA ($W^r \cdot W^r$)	14,52	1	14,52	14,16	0,0094
AB ($W^r \cdot \alpha$)	1,03018	1	1,03018	1,00	0,3548
AC ($W^r \cdot S^r$)	207,844	1	207,844	202,74	0,0000
BB ($\alpha \cdot \alpha$)	0,70541	1	0,70541	0,69	0,4386
BC ($\alpha \cdot S^r$)	0,0264022	1	0,0264022	0,03	0,8778
CC ($S^r \cdot S^r$)	12,0434	1	12,0434	11,75	0,0140
Total error	6,15098	6	1,02516		
Total (corr.)	1812,0	15			

R-squared = 99,6605 percent

R-squared (adjusted for d.f.) = 99,1514 percent

Standard Error of Est. = 1,0125

Mean absolute error = 0,5329

Durbin-Watson statistic = 1,1684 (P=0,0204)

Lag 1 residual autocorrelation = 0,2896

Таблиця А1.3. Estimated effects for ΔG_3 (Оцінені ефекти для ΔG_k)

Effect (Ефект)	Estimate (Оцінка)	Stand. Error (Стандартне відхилення)
average (середнє значення)	12,8405	0,579002
A: W^r	-14,6198	0,675901
B: α	1,54653	0,555177
C: S^r	16,3005	0,525021
AA ($W^r \cdot W^r$)	3,99586	1,06175
AB ($W^r \cdot \alpha$)	-0,716044	0,7143
AC ($W^r \cdot S^r$)	-10,1822	0,715103
BB ($\alpha \cdot \alpha$)	0,492807	0,594091
BC ($\alpha \cdot S^r$)	0,114353	0,712563
CC ($S^r \cdot S^r$)	1,66058	0,484485

Рівняння регресії отриманої моделі процесу корозії:

$$\Delta G_k = -2,52262 + 0,450857W^r - 8,57701\alpha + 17,0426S^r + 0,0101935(W^r)^2 - 0,0730657 \\ - 0,727298W^r S^r + 2,01146\alpha^2 + 0,326722\alpha S^r + 3,32115(S^r)^2$$

Результати статистичної обробки експериментальних даних, отримані за допомогою програмного комплексу Statgraphics Centurion XV приведені нижче.

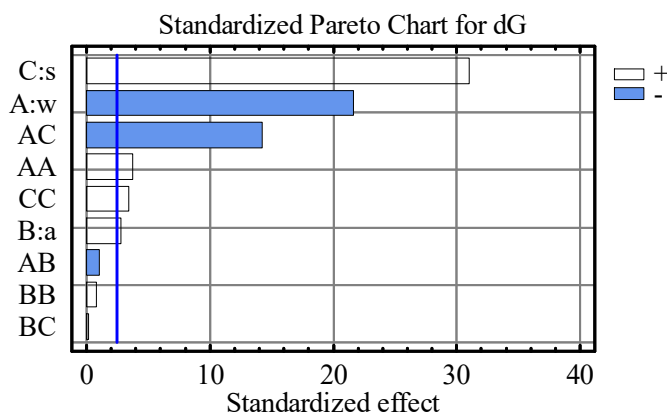


Рис. А.1.1. Карта Парето

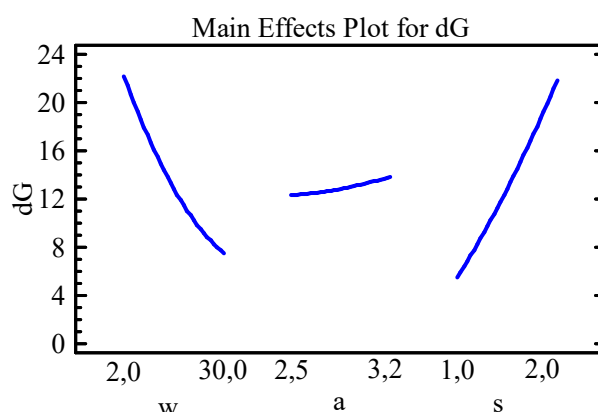


Рис. А.1.2. Графіки головних ефектів

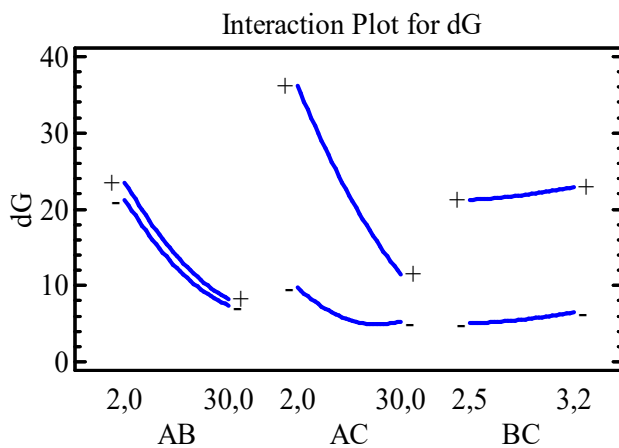


Рис. А.1.3. Графіки взаємодії параметрів

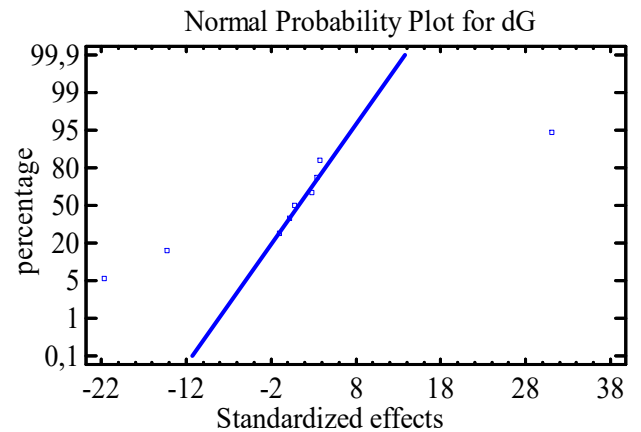


Рис.А.1.4. Графік нормального розподілу

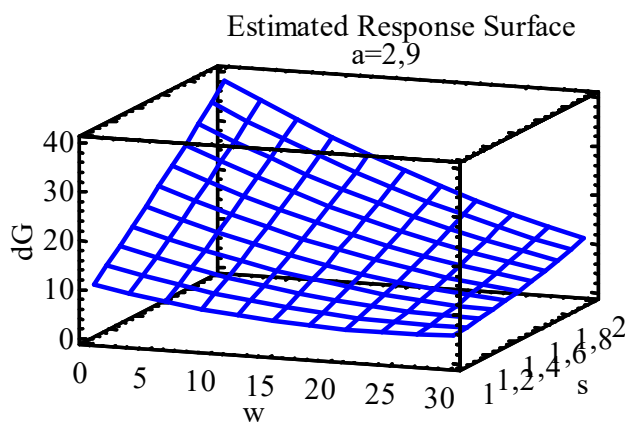


Рис. А.1.5. Тривимірна поверхня

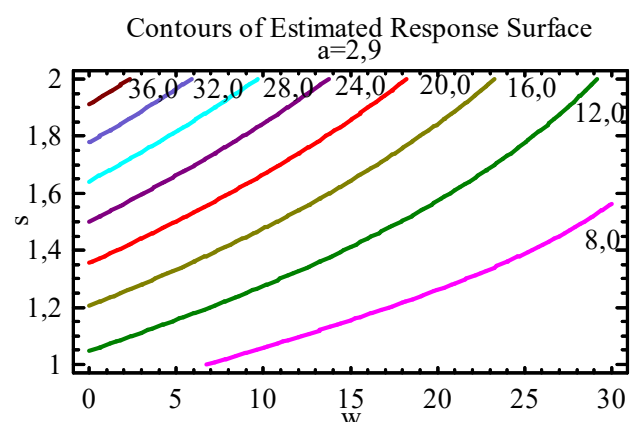


Рис. А.1.6. Контурний графік

А3. Планування експерименту низькотемпературного забруднення

Таблиця А3.1. Вихідні дані

	run	w	a	s	dG
1	1	30	3,2	1	40
2	1	30	2,5	2	120
3	1	2	3,2	1	72
4	1	2	3,2	2	215
5	1	30	2,5	1	35
6	1	2	2,5	1	60
7	1	15	2,9	1,5	133
8	1	2	2,5	2	200
9	1	17	2,9	0,6	25
10	1	30	2,9	1,5	95
11	1	30	3,2	2	127
12	1	17	2,9	1,5	130
13	1	17	3,4	1,5	143
14	1	17	2,2	1,5	125
15	1	10	2,9	1,5	138
16	1	17	2,9	2,5	205

Таблиця А3.2. Analysis of Variance for dG

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
A: W^r	6645,5	1	6645,5	136,79	0,0000
B: α	365,141	1	365,141	7,52	0,0337
C: S^r	42509,4	1	42509,4	874,98	0,0000
AA ($W^r \cdot W^r$)	1142,48	1	1142,48	23,52	0,0029
AB ($W^r \cdot \alpha$)	23,1954	1	23,1954	0,48	0,5154
AC ($W^r \cdot S^r$)	1598,61	1	1598,61	32,90	0,0012
BB ($\alpha \cdot \alpha$)	14,9798	1	14,9798	0,31	0,5988
BC ($\alpha \cdot S^r$)	0,150136	1	0,150136	0,00	0,9575
CC ($S^r \cdot S^r$)	698,18	1	698,18	14,37	0,0091
Total error	291,501	6	48,5836		
Total (corr.)	52821,9	15			

R-squared = 99,4481 percent

R-squared (adjusted for d.f.) = 98,6204 percent

Standard Error of Est. = 6,97019

Mean absolute error = 3,59008

Durbin-Watson statistic = 1,26122 (P=0,0323)

Lag 1 residual autocorrelation = 0,242996

Таблиця А3.3. Estimated effects for ΔG_3 (Оцінені ефекти для ΔG_k)

Effect (Ефект)	Estimate (Оцінка)	Stand. Error (Стандартне відхилення)
average (середнє значення)	132,22	3,98655
A: W^r	-54,0392	4,62051
B: α	10,477	3,82166
C: S^r	106,909	3,61423
AA ($W^r \cdot W^r$)	-35,2686	7,27293
AB ($W^r \cdot \alpha$)	-3,39828	4,91816
AC ($W^r \cdot S^r$)	-28,2387	4,92285
BB ($\alpha \cdot \alpha$)	2,26559	4,08012
BC ($\alpha \cdot S^r$)	0,27269	4,90537
CC ($S^r \cdot S^r$)	-12,6158	3,32794

Рівняння регресії отриманої моделі процесу забруднення:

$$\Delta G_3 = 119,896 + 2,0218W^r - 168,875\alpha + 198,06S^r - 0,0687(W^r)^2 + \\ + 0,2881W^r\alpha - 1,7212W^rS^r + 26,313\alpha^2 + 14,3069\alpha S^r - 29,7926(S^r)^2.$$

Результати статистичної обробки експериментальних даних, отримані за допомогою програмного комплексу Statgraphics Centurion XV приведені нижче.

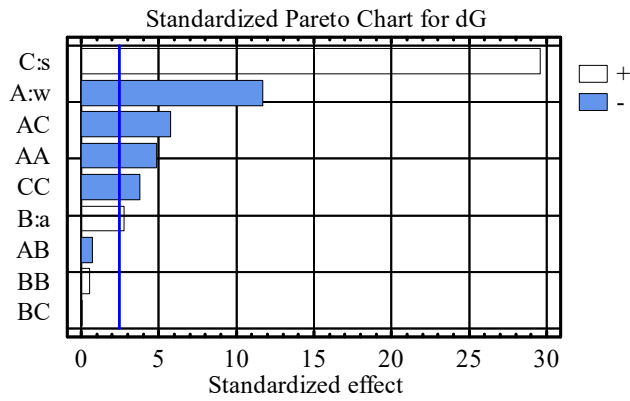


Рис. А.3.1. Карта Парето

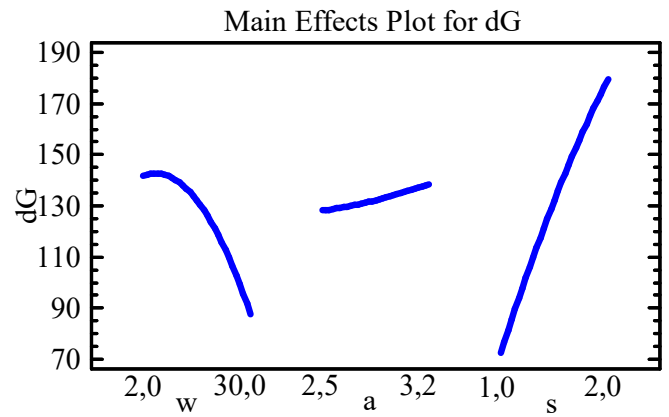


Рис. А.3.2. Графіки головних ефектів

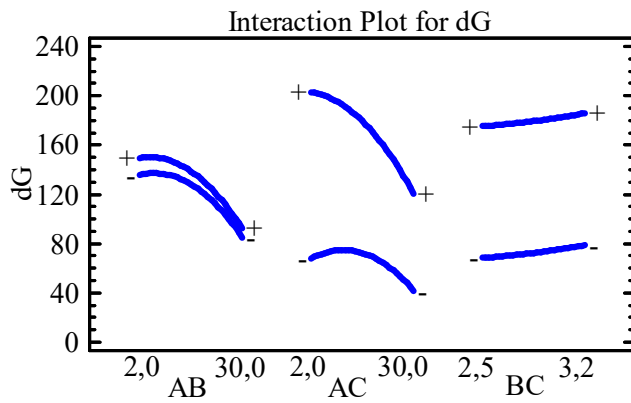


Рис. А.3.3. Графіки взаємодії параметрів

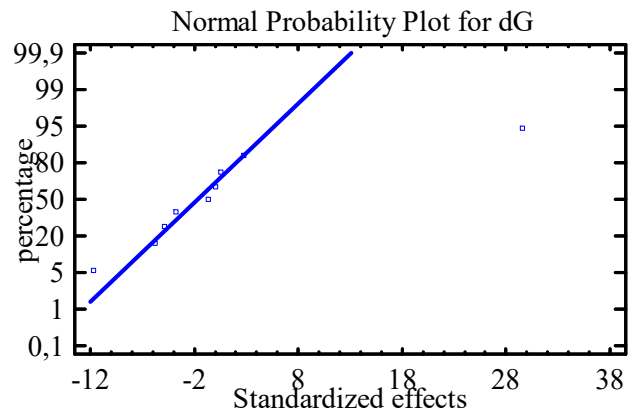


Рис. А.3.4. Графік нормального розподілу

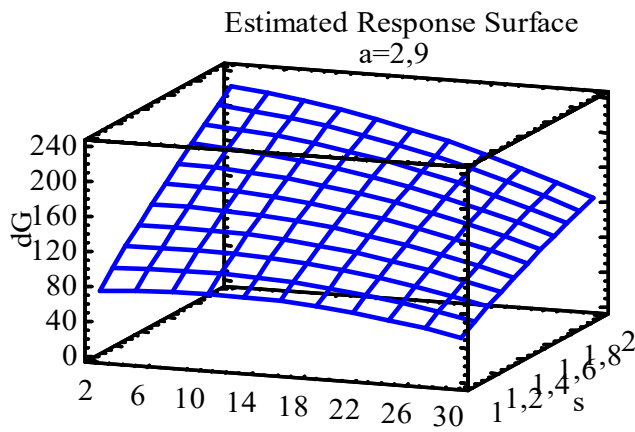


Рис. А.3.5. Тривимірна поверхня

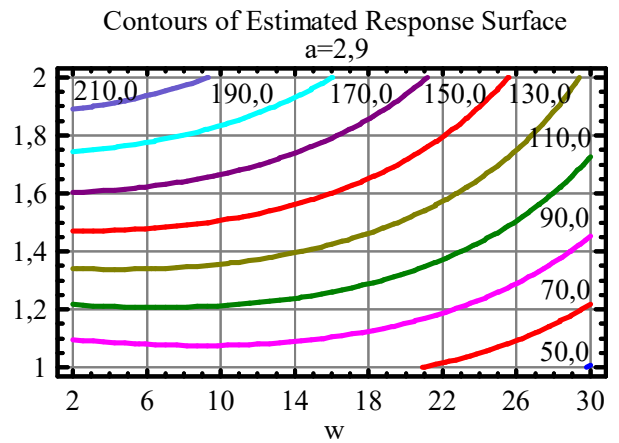


Рис. А.3.6. Контурний графік

ДОДАТОК Б

Список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості про апробацію
результатів дисертації

Список публікацій здобувача за темою дисертації

Основні результати дисертації:

1. Корниенко В.С. Интенсивность процессов загрязнения поверхностей нагрева утилизационных котлов при сжигании водомазутных эмульсий. Авиационно-космическая техника и технология. 2017. № 1 (136). С. 48–53.

2. Корниенко В.С., Радченко А.Н., Андреев А.А., Щербак Ю.Г. Влияние загрязнения на тепловую эффективность поверхностей нагрева утилизационных котлов при использовании водотопливных эмульсий на основе маловязких топлив. Авиационно-космическая техника и технология. 2018. №2 (146). С.28–32.

Особистий внесок: удосконалення методики визначення коефіцієнта теплової ефективності поверхонь нагріву утилізаційних котлів.

3. Корнієнко В.С. Вплив забруднення поверхонь нагрівання на інтенсивність теплопередачі в утилізаційних котлах при спалюванні водопаливних емульсій. Вісник Приазовського державного технічного університету. Сер. Технічні науки. 2017. вип.35. С. 78–86.

4. Корниенко В.С. Исследование работы ротационных форсунок. Авиационно-космическая техника и технология. 2013. № 8 (105). С. 142–146.

5. Горячкин В.Ю., Корниенко В.С. Интенсивность коррозионных процессов в утилизационных котлах при сжигании водотопливных эмульсий. Вестник АГТУ. Сер. Морская техника и технология. 2013. №2. С. 101–110.

Особистий внесок: розробка математичної моделі визначення інтенсивності корозії поверхонь нагріву утилізаційних котлів.

6. Радченко А.М., Андреев А.А., Корнієнко В.С. Забруднення поверхонь нагріву утилізаційних котлів при спалюванні водопаливних емульсій на основі малов'язких палив. Авиационно-космическая техника и технология. 2018. № 1 (145). С. 43-47.

Особистий внесок: розробка математичної моделі визначення інтенсивності забруднення поверхонь нагріву утилізаційних котлів.

7. Спосіб захисту металу низькотемпературних поверхонь нагріву котла від сірчаноокислотної корозії: пат. 99408 Україна: МПК C23F 11/10, F22B 37/00, F23J 15/00 / Горячкін В.Ю., Горячкін А.В., Акімов О.В., Іутінський В.О., Корнієнко В.С.; № 201110299; заявл. 23.08.11; опубл. 10.08.12, Бюл. № 15.

Особистий внесок: розробка і аналіз механізму процесу пасивації поверхонь нагріву утилізаційних котлів від низькотемпературної сірчаноокислотної корозії.

8. Спосіб підготовки водопаливної емульсії для енергетичних установок, в яких спалюється сірчисте органічне паливо: пат. 115037 Україна: МПК B01D 53/60, B01D 53/14, F02B 47/02, F02M 25/022, F23D 11/16 / Горячкін В.Ю., Горячкін А.В., Акімов О.В., Корнієнко В.С., Філіпчук О.М., Тендітний Ю.Г.; №201402318; заявл. 06.03.14; опубл. 11.09.17, Бюл. № 17.

Особистий внесок: розробка схемно-конструктивних рішень системи очищення відхідних газів конденсаційними поверхнями нагріву утилізаційних котлів.

Апробація матеріалів дисертації:

7. Корниенко В.С. Исследование динамики низкотемпературной коррозии и загрязнения поверхностей нагрева утилизационных котлов. Рыбне господарство України. 2013. №3(86). С. 62–65.

8. Корниенко В.С. Возможности комплексной утилизации теплоты судовых ДВС. Всеукраїнський форум молодих науковців "Макаровські читання". Миколаїв: НУК, 2012 р. С. 23–24.

9. Корнієнко В.С. Підвищення ефективності утилізації теплоти вихлопних газів ДВЗ при спалюванні водомазутних емульсій і при використанні судових прямооточних котлів. Інновації в суднобудуванні та океанотехніці: матеріали II Міжнародної науково-технічної конференції. Миколаїв: НУК, 2011. С. 200–203.

10. Корнієнко В.С. Інтенсивність низькотемпературної корозії в утилізаційних котлах при спалюванні водопаливних емульсій. Всеукраїнський

форум молодих науковців "Макаровські читання". Миколаїв: НУК, 2013. С. 12-13.

11. Горячкін В.Ю., Андреев А.А., Корнієнко В.С. Ефективність допалювання водопаливних емульсій перед утилізаційними котлами. Сучасні інформаційні і іноваційні технології на транспорті: матеріали Міжнародної науково-практичної конференції. Херсон: ХДМІ, 2017. С. 67-69.

Особистий внесок: удосконалення методики і проведення розрахунків теплоутилізаційних контурів при допалюванні палива перед утилізаційним котлом.

12. Горячкін В.Ю., Андреев А.А., Корнієнко В.С. Влияние загрязнения конденсационных поверхностей нагрева на интенсивность теплопередачи. Всеукраїнська науково-практична конференція молодих учених, спеціалістів, аспірантів «Проблеми енергоресурсозбереження в промисловому регіоні. Наука і практика»: Зб. тездоповідей. Маріуполь: ДВНЗ «ПДТУ», 2017. С. 100-102.

Особистий внесок: проведення розрахунків і аналіз результатів визначення коефіцієнта забруднення поверхонь нагріву утилізаційних котлів.

13. Горячкин В.Ю., Корниенко В.С. Эффективность энергосбережения при сжигании сернистых водотопливных эмульсий. Іновації в суднобудуванні та океанотехніці: матеріали Міжнародної науково-технічної конференції. Миколаїв: НУК, 2017. С.198-199.

Особистий внесок: удосконалення методики визначення коефіцієнтів теплової ефективності конденсаційних поверхонь нагріву утилізаційних котлів.

14. Горячкін, В.Ю., Андреев А.А., Корнієнко В.С. Возможности применения конденсационных поверхностей нагрева при сжигании сернистых водотопливных эмульсий. Суднова енергетика: стан та проблеми: матеріали VIII Міжнародної науко-технічної конференції. Миколаїв: НУК, 2017. С.359-363.

Особистий внесок: аналіз можливостей використання конденсаційних поверхонь нагріву в утилізаційних котлах.

15. Горячкін В.Ю., Горячкін А.В., Іутінський В.О., Кондя В.С. Підвищення ефективності утилізації теплоти сучасних дизельних енергетичних установок. Сучасні інформаційні і іноваційні технології на транспорті: матеріали Міжнародної науково-практичної конференції. Том 2. Херсон: ХДМІ, 2010. С. 193–196.

Особистий внесок: аналіз існуючих схем утилізації теплоти енергетичних установок.

16. Горячкин В.Ю., Андреев А.А., Корниенко В.С. Когенерационные установки с ДВС. Муніципальна енергетика: проблеми, рішення: матеріали IV Міжнародної науково-технічної конференції. – Миколаїв: НУК, 2011. С. 194–197.

Особистий внесок: розробка схемно-конструктивних рішень когенераційних установок.

17. Горячкін В.Ю., Горячкін А.В., Іутінський В.О., Корнієнко В.С. Ефективний спосіб захисту металу низькотемпературних поверхонь нагріву котла від сірчаноокислотної корозії. Інновації в суднобудуванні та океанотехніці: матеріали III Міжнародної науково-технічної конференції. Миколаїв: НУК, 2012. С. 253–255.

Особистий внесок: аналіз механізмів захисту металу від низькотемпературної сірчаноокислотної корозії при використанні водопаливних емульсій.

18. Горячкин В.Ю., Горячкин А.В., Новиков В.И., Корниенко В.С. Исследования кинетики низкотемпературной коррозии и загрязнения поверхностей нагрева УК. Інновації в суднобудуванні та океанотехніці: матеріали III Міжнародної науково-технічної конференції. Миколаїв: НУК, 2012. С. 280–281.

Особистий внесок: розробка математичної моделі визначення кінетики процесів корозії і забруднення.

19. Горячкин В.Ю., Горячкин А.В., Корниенко В.С. Эффективность утилизации теплоты ДВС при дожиге топлива перед УК. Інновації в

суднобудуванні та океанотехніці: матеріали III Міжнародної науково-технічної конференції. Миколаїв: НУК, 2012. С.256–257.

Особистий внесок: аналіз існуючих схем розрахунку теплоутилізаційних контурів з допалюванням палива перед утилізаційним котлом.

20. Горячкин В.Ю., Андреев А.А., Корниенко В.С. Загрязнение конденсационных поверхностей нагрева утилизационных котлов при сжигании водомазутных эмульсий. Іновації в суднобудуванні та океанотехніці: матеріали Міжнародної науково-технічної конференції. Миколаїв: НУК, 2016. С.136-137.

Особистий внесок: розробка математичної моделі визначення інтенсивності забруднення поверхонь нагріву утилізаційних котлів.

21. Горячкин В.Ю., Андреев А.А., Корниенко В.С. Улучшение экологических показателей при установке конденсационных поверхностей в утилизационных котлах. Іновації в суднобудуванні та океанотехніці: матеріали Міжнародної науково-технічної конференції. Миколаїв: НУК, 2016. С.281-282.

Особистий внесок: аналіз можливостей застосування конденсаційних поверхонь нагріву утилізаційних котлів в системах очищення відхідних газів.

Праці [1–4, 6] опубліковано у виданнях, які входять до міжнародної наукометричної бази даних Index Copernicus, [5] – до наукометричної бази даних РІНЦ.

ДОДАТОК В

Документи, що засвідчують впровадження результатів роботи

"ЗАТВЕРДЖУЮ"

Проректор з науково-педагогічної роботи
та міжнародної діяльності Національного
університету кораблебудування

імені адмірала Макарова

канд. техн. наук, професор НУК

Є.І. Трушляков

2017 р.



ДОВІДКА

про використання

в навчальному процесі результатів дисертаційної роботи

Корнієнко Вікторії Сергіївни

"Підвищення ефективності теплоутилізаційних контурів когенераційних
установок при використанні водопаливних емульсій"

Методики розрахунку теплоутилізаційних контурів утилізаційних котлів суднових енергетичних установок, обчислювальні програми, розроблені Корнієнко В.С., використовуються на кафедрі теплотехніки Херсонської філії НУК у лекційних курсах, на практичних заняттях та у курсовому проектуванні зі спеціальності 142 "Енергетичне машинобудування", спеціалізації "Холодильні машини і установки" з дисциплін "Теоретичні основи холодильної техніки" та "САПР в теплохладотехніці".

Зав. кафедрою теплотехніки Херсонської філії
Національного університету кораблебудування
імені адмірала Макарова
к-т, техн. наук, доцент



В.С. Самохвалов

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор ТОВ "Група компаній "Теплотехніка"

О.В. Скороход

2017р.



АКТ

впровадження методики теплового розрахунку

Методика теплового розрахунку конденсаційних поверхонь нагріву котельних установок при спалюванні водопаливних емульсій з вмістом 20-30 % та температурах стінки нижче температури точки роси пари сірчаної кислоти і води, номограми для визначення теплового опору шару забруднень і теплопередачі в конденсаційних поверхнях нагріву котлів, розроблені Корнієнко В.С., викладачем Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова, прийняті до використання ТОВ "Група компаній "Теплотехніка" при проектуванні котельних установок для систем тепlopостачання.

Рекомендації з проектування котельних установок, розроблені Корнієнко В.С., дозволяють збільшити глибину утилізації відхідних газів до 70 % (замість 45 %), за рахунок чого підвищити ККД котлів до 95% порівняно з 90%.

Методика розрахунку теплового опору забруднень і теплопередачі дає можливість збільшити точність розрахунку конденсаційної поверхні, економічних і екологічних показників котлів.

Запропоновані Корнієнко В.С. схемно-конструктивні рішення утилізаційних контурів прийняті до використання при проектуванні суднових когенераційних установок, які працюють на водопаливних емульсіях. За нашими розрахунками економія палива становить близько 8 % за рахунок більш повного використання теплоти відхідних газів (до 95%).

Цей акт не є основою для фінансових взаєморозрахунків.

Начальник проектного відділу

Коргутлова Л.П.



А К Т

внедрения тригенерационной системы охлаждения воздуха на входе двигателей установки автономного энергоснабжения с использованием тепла выпускных газов в утилизационном котле, наддувочного воздуха и охлаждающей воды и масла, разработанной в рамках проекта "Повышение топливной эффективности двигателей охлаждением воздуха с использованием сбросной теплоты"

Тригенерационная установка автономного энергоснабжения состоит из 2 когенерационных газовых двигателей-электрогенераторов, теплоиспользующих абсорбционных бромистолитиевых холодильных машин AR-D500L2 Century, 2 центральных кондиционеров, 4 градирен оборотного охлаждения Evapco AT 28-528 и производит холод для охлаждения воздуха на входе газовых двигателей и технологических нужд, используя сбросное тепло двигателей. Проектирование и монтаж тригенерационной установки на заводе ООО "Сандора" (п. Южный, Николаевская обл.) выполнен ООО "Хладотехника".

Разработка тепловых схем тригенерационной установки и теплоиспользующей системы охлаждения, расчет их рациональных теплотехнических характеристик и теплообменных аппаратов, теплоиспользующих холодильных машин и тепловлажностных параметров кондиционируемого воздуха на входе газовых двигателей выполнены совместно с сотрудниками кафедры кондиционирования и рефрижерации Национального университета кораблестроения: к.т.н. Радченко А.Н. (разработка тепловой схемы и методологии расчета рациональных параметров тригенерационной установки автономного энергоснабжения), к.т.н. Радченко Р.Н. (разработка тепловой схемы и методологии расчета рациональных параметров теплоиспользующей системы охлаждения), аспирантами Портным Б.С. (расчет рациональных параметров комбинированной системы охлаждения воздуха двигателей с учетом меняющихся климатических условий эксплуатации), Булавкой С.С. (расчет рациональных тепловлажностных параметров системы кондиционирования), Прядко А.С. (теплогидродинамический расчет воздухоохладителей и определение их рациональных параметров), преподавателями Калиниченко И.В. (расчет рациональных параметров абсорбционной теплоиспользующей системы охлаждения двигателей), Корниенко В.С. (расчет рациональных параметров теплоутилизационных контуров когенерационных модулей двигателей с глубокой утилизацией тепла отработанных газов).

Уменьшение потребления топлива за счет утилизации сбросной теплоты и производства холода тригенерационной установкой составляет 520 т за год и годовой эффект 186 тыс \$.

Настоящий акт не является основанием для финансовых взаиморасчетов.

Технический директор
Экономист

Спекторенко Д. А.
Кравченко А. З.