

В. Л. КАВЕРЦЕВ, В. О. ДЯГІЛЕВ, Т. О. ЄСИПЕНКО

УДОСКОНАЛЕННЯ МОДЕЛІ ТЕПЛОГІДРАВЛІЧНОГО РОЗРАХУНКУ МУЛЬТІПАЛИВНОГО КОТЕЛЬНОГО АГРЕГАТУ

Метою даної статті є створення напряму до розробки комплексної програми розрахунку мультіпаливних котельних агрегатів. У статті пропонується вдосконалення моделі теплогідрравлічного розрахунку мультіпаливного котла. Представлений варіант логічної блок-схеми теплового розрахунку мультіпаливного котельного агрегату з урахуванням його системи сепарації. Цю блок-схему можна буде використовувати для розробки варіантів конструкцій мультіпаливних котельних агрегатів за допомогою програмних комплексів в комп'ютерному середовищі. Розроблені рішення можуть бути застосовані при розробці перспективних конструкцій мультіпаливних котельних агрегатів, здатних працювати в широкому діапазоні експлуатаційних навантажень.

Ключові слова: енергетика, котельний агрегат, розрахунок, математична модель, сепарація, температурний напір.

В. Л. КАВЕРЦЕВ, В. А. ДЯГИЛЕВ, Т. А. ЕСИПЕНКО

УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МОДЕЛИ ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКОГО РАСЧЕТА МУЛЬТИТОПЛИВНОГО КОТЕЛЬНОГО АГРЕГАТА

Целью данной статьи является усовершенствование модели теплогидравлического расчета мультитопливного котельного агрегата. Представлен вариант логической блок-схемы теплового расчета мультитопливного котельного агрегата с учетом его системы сепарации. Эту блок-схему можно будет использовать для разработки вариантов конструкций мультитопливных котельных агрегатов при помощи программных комплексов в компьютерной среде. Разработанные решения могут быть применены при разработке перспективных конструкций мультитопливных котельных агрегатов, способных работать в широком диапазоне эксплуатационных нагрузок.

Ключевые слова: энергетика, мультитопливный котельный агрегат, модель теплогидравлического расчета, сепарация, температурный напор.

V. KAVERTSEV, V. DYAHILIEV, T. ESIPENKO

IMPROVING THE MODEL OF THERMOHYDRAULIC DESIGN OF MULTIFUEL BOILER AGGREGATE

The purpose of this research was to demonstrate that an efficient use of the fuel and power resources provides a stable energy supply for the State. Attention is paid the fact that the metallurgy industry sector being the principal consumer of power resources faces the situations of irrational fuel use. The speech is mainly about series gas-&heavy oil boiler aggregates designed for the firing of natural gas and heavy oil only. The design of multifuel boiler aggregates that can work on two and more types of fuel and the modernization and reconstruction of already available boilers of this type presuppose the solution of complicated engineering problems in the form of different computations done to determine optimal characteristics of the boiler equipment. This scientific paper suggests the improved heat-hydraulic computation method to do computations required for the construction of new boiler aggregates that operate on different types of organic fuels. A mathematical model for the computation of separation in the boiler aggregate was developed to simplify computations. It is stated in the conclusions that the algorithm and the logic flowchart of the model enable the computation of the entire variety of the elements and circuit designs for the multifuel boiler.

Key words: power engineering, boiler aggregate, computation, mathematical model, separation and the temperature head.

Вступ

На даний час, питання що до проблеми ефективного використання та споживання паливно-енергетичних ресурсів в промисловості України є дуже актуальним. Зараз, у цьому напрямку, ведеться активний пошук технічних рішень, які можуть знизити собівартість теплової та електричної енергії. Вирішення проблем енергоемності виробництва та енергозабезпечення вітчизняного споживача є найважливішими умовами економічного розвитку та енергетичної безпеки країни.

Напрямок відновлення енергетичного і промислового потенціалу країни повинен займати визначальне місце в державній програмі підвищення енергоефективності. Тут, в першу чергу треба вирішувати питання, що до зменшення обсягів споживання країною природного газу. Тому, як один з найбільш реальних варіантів використання

існуючих вітчизняних паливно-енергетичних ресурсів пропонується побудова нових мультіпаливних котельних агрегатів.

При проектуванні, дослідженні і налагодженні котельних агрегатів в останні роки все ширше і частіше використовуються інструменти моделювання, засноване на фізичних законах, які описують досліджувані процеси. Будь-які рівні моделювання конструкцій мультіпаливних котельних агрегатів відноситься до класу важких завдань, з огляду на складність їх виробництва, і, як наслідок, при алгоритмізації такого виду завдань виникають певні труднощі.

Мета роботи

Роботи з проектування мультіпаливних котельних агрегатів, а також з модернізації і реконструкції вже існуючих котельних установок, перед-

© В. Л. Каверцев, В. О. Дягілев, Т. О. Єсіпенко, 2018

бачають вирішення складних технічних завдань. Це можна уявити у вигляді виконання різних розрахунків для визначення оптимальних технічних характеристик мультіпаливних котлів. Ці технічні завдання можуть бути вирішені на основі широкого використання сучасної обчислювальної техніки, систем і методів автоматизованого проектування. Тому, метою даної роботи є створення варіанту оптимальної моделі теплогідрравлічного розрахунку мультіпаливного котельного агрегату з урахуванням усіх його систем. У даному випадку з урахуванням його сепараційної системи. В кінцевому рахунку, створений оптимальний алгоритм і логіко-структурна схема моделі розрахунку мультіпаливного котла дозволить ефективно розробляти велике різноманіття варіантів конструкцій і схемних рішень в умовах сучасного проектування й виготовлення.

Викладення основного матеріалу

Заміна використання природного газу на більш доступні види палива є актуальним завданням вітчизняної енергетики. Серед варіантів заміни природного газу вже використовується в значному обсязі вторинні енергетичні ресурси (ВЕР), біомаса та інше. Також є доцільним впровадження технологій спалювання природного газу спільно з іншими видами газів або повна його заміна веде за собою пряме скорочення обсягів газу, що споживаються підприємством. Це зменшує витрати на енергоносії та знижує собівартість продукції. Такі технології вже застосовуються в мультіпаливних котлах, здатних спалювати різні види палива, як окремо, так і спільно [1].

В Україні знаходиться в експлуатації немала кількість котельних агрегатів, що працюють на природному газі і в той же час знаходяться на території коксохімічних або металургійних підприємств, де досить багато виробляється коксового або доменного газів, якого в достатній кількості, щоб використовувати в якості палива. Мова йде про серійні газо-мазутні котельні агрегати, які спочатку були розраховані на спалювання тільки цих двох видів палива. Тому доцільним є використання коксових, доменних, та інших газів, які виробляються підприємствами, в якості палива для котельних агрегатів, встановлених на місцевих ТЕЦ. Однак, перехід на більш широкий спектр використання палив в котлі можливо здійснити в рамках реконструкції підприємства, або окремої котельні. Відомо, що для цього розробляються техніко-економічні обґрунтування, результати яких дають відповідь про доцільність проведення, наприклад, реконструкції котельного агрегату. Тут враховується велика кількість основних показників. До них відносяться витрати на паливо, витрати на експлуатацію, вартість робіт і т.п. Крім того, якщо мова йде про спалювання декількох палив,

або їх суміші, необхідно визначити найбільш економічний режим роботи. З урахуванням цього визначається термін окупності проекту.

Вартість робіт багато в чому залежить від обсягу реконструкції котельного агрегату. Як показує практика, більшу частину робіт, пов'язаних з переведенням на інше паливо становлять роботи з нижньої частини топки, де можливо будуть встановлені нові пальники і здійснена заміна профілю піду котла. Що стосується інших поверхонь нагріву, розташованих по ходу газів (продуктів згоряння палива), то вони можуть конструктивно залишитися тими ж, якщо їх технічний стан і термін служби дозволяють їх подальшу експлуатацію. Загалом, схема пароводяного тракту може залишитися, практично, без змін, однак остаточні кордони реконструкції можна буде визначити лише за результатами конструкторських розрахунків. Це, перш за все, стосується теплогідрравлічних розрахунків котла.

В даний час розроблено досить багато версій моделей і програм теплових розрахунків котлів різних типорозмірів [2–5]. Ці моделі і програми мають різне функціональне призначення: деякі з них призначені для проведення конструктивних розрахунків, інші – для виконання перевірочних або оптимізаційних, діагностичних розрахунків і досліджень.

У даній статті наведено варіант алгоритму і логіко-структурної схеми моделі теплогідрравлічного розрахунку котла, яка враховує все різноманіття елементів і схемних рішень, що застосовуються для мультіпаливних котельних установок.

Алгоритм розрахунку включає в себе чотири ієрархічних рівня:

- 1-й рівень – керуюча програма;
- 2-й рівень – програми розрахунку теплового балансу котлів;
- 3-й рівень – програми розрахунку основних конструктивних елементів;
- 4-й рівень:
 - а) програми розрахунку термодинамічних і теплофізичних параметрів теплоносіїв і робочих середовищ (води, пари, повітря і димових газів);
 - б) програма розрахунку коефіцієнтів теплопередачі для різних теплообмінних поверхонь;
 - в) програма розрахунку температурного напору для випадків прямого теплоносіїв, протитопку, послідовно-змішаного паралельно-змішаного і перехресного струменів.

Вихідною інформацією для розрахунків параметрів нагрівальних, випарних поверхонь є їх геометричні характеристики: діаметр труб і їх товщина; кроки труб; тип пучка – коридорний або шаховий. Крім того, в якості вихідної інформації використовуються коефіцієнти використання і теплової ефективності, а також характер взаємного руху потоків теплоносіїв і робочих тіл.

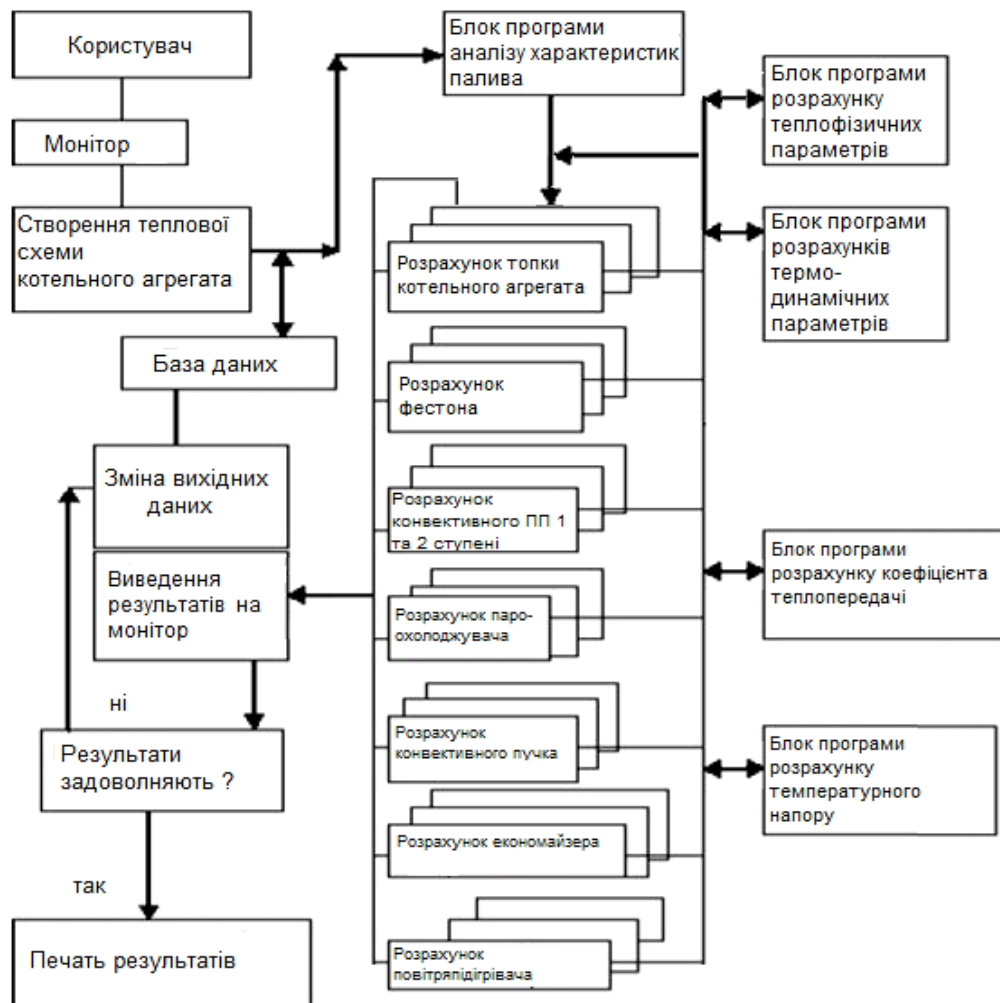


Рис. 1 – Логічна блок-схема теплового розрахунку мультіпаливного котельного агрегату

Вихідною інформацією для теплового розрахунку мультіпаливного котла є: значення витрати палива, паропроductивності, обсягу і температури продуктів згоряння на вході в котел, температури газів, що відходять, температури і тиск перегрітої (насиченої) пари, температури і тиск живильної води, склад димових газів, відсоток продувки, наявність, тип та теплосприйняття пароохолоджувача.

Логічна блок-схема моделі теплового розрахунку мультіпаливного котельного агрегату представлена на рис. 1.

Для виконання теплових розрахунків котла в комп'ютерному середовищі в процесі розробки його конструкції, а також визначення експлуатаційних характеристик його роботи доцільно використання математичної моделі. При побудові математичної моделі складного об'єкта, яким є котел, не вдається отримати функції, що зв'язують безпосередньо вхідні та вихідні параметри. Для цього необхідно розділити котел на окремі технологічні складові. Потім будується модель у вигляді сукупності окремих ділянок, які з'єднуються відповідно до структурної схемою котла. Елементи

котла є об'єктами з зосередженими та розподіленими параметрами, передаточної функції яких визначаються на основі диференціальних рівнянь, наведених нижче. При складанні таких диференціальних виражень зазвичай виходять з рівнянь матеріального і теплового балансів, з цього випливає, що зміна маси речовини в замкнутому просторі в одиницю часу одно алгебраїчній сумі вхідних і вихідних матеріальних потоків [6-7]:

$$\sum_{i=1}^{i=k} D_i - \sum_{j=1}^{j=r} D_j = \frac{dG}{d\tau}, \quad (1)$$

де D_i ($i=1, 2, \dots, k$) – масова витрата вхідного i -го потоку;

D_j ($j=1, 2, \dots, r$) – масова витрата вихідного

r -го потоку;

G – маса речовини в даному обсязі;

τ – час.

Аналогічно зміна ентальпії певної речовини в одиницю часу:

$$\sum_{i=1}^{i=k} Q_i = \sum_{j=1}^{j=r} Q_j = \frac{dH}{d\tau}, \quad (2)$$

де Q_i ($i=1, 2, \dots, k$) – вхідний потік теплоти;

Q_j ($j=1, 2, \dots, r$) – вихідний потік теплоти;

H – ентальпія речовини.

При аналітичному дослідженні зазвичай потік середовища приймається одновимірним і з постійними фізичними параметрами по перетину труби. Зміною кінетичної і потенційної енергії середовища можна знехтувати, оскільки ці величини малі в порівнянні зі зміною теплоти. Тоді основні рівняння для робочого середовища будуть такими:

– рівняння енергії

$$Fr\omega \frac{\partial h}{\partial y} + Fr\rho \frac{\partial H}{\partial \tau} = q_2; \quad (3)$$

– рівняння цілісності

$$\frac{\partial \rho \omega}{\partial y} + \frac{\partial \rho}{\partial \tau} = 0; \quad (4)$$

– рівняння руху

$$\frac{\partial p}{\partial y} + \omega \rho \frac{\partial \omega}{\partial y} + \rho \frac{\xi \omega^2}{d^2} + k\rho g = 0; \quad (5)$$

– рівняння стану

$$h = f_i(\theta, p), \quad \rho = f_p(\theta, p), \quad (6)$$

де F – площа поперечного перерізу потоку середовища;

ρ – щільність середовища;

ω – швидкість середовища;

h – ентальпія середовища;

q_2 – тепловий потік через внутрішню поверхню одиниці довжини ділянки;

p – тиск середовища;

g – прискорення вільного падіння;

ξ – коефіцієнт тертя;

k – коефіцієнт нахилу труби;

d_2 – внутрішній діаметр труби.

При нестационарному теплообміні рівняння доповнюються граничними умовами, визначеними конкретними умовами роботи даної ділянки. Передаточні функції отримують шляхом вирішення наведених рівнянь в області зображень Лапласа після переходу до відхилень змінних і лінеаризації рівнянь. При вирішенні рівнянь зазвичай приймають такі спрощення: тепловий потік постійний по довжині труб; зміна витрати і тиску середовища відбувається одночасно по всій довжині труб; коефіцієнт тепловіддачі α_2 приймають середнім по довжині і залежних від витрати середовища: $\alpha_2 = f(G)$ теплоємність середовища приймають постійною і дорівнює середньому значенню по довжині труб.

Доцільним, для отримання більш точного результату, буде використання перевірочних програм, як для окремих конструктивних елементів котла, так і для окремих показників.

Наприклад, окремо, такий важливий показник, як температурний напір поверхні нагрівання, можна уявити, як:

$$dt = f(t', t'', \vartheta', \vartheta''), \quad (7)$$

де $t', t'', \vartheta', \vartheta''$ – температури, відповідно, на вході і на виході робочого тіла, і продуктів спалювання в поверхні нагрівання.

Фрагмент елементарної розрахункової програми температурного напору (на мові *Fortran*) може виглядати наступним чином див. табл. 1.

Таблиця 1 – Фрагмент програми для розрахунку температурного напору

PROGRAM TN1
REAL T1, T2, TH1, TH2, DTB, DTM, DT
300 PRINT 100, 'T1'
100 FORMAT(1X, A3, '=' '\')
READ *, T1
PRINT 100, 'T2'
READ *, T2
PRINT 100, 'TH1'
READ *, TH1
PRINT 100, 'TH2'
READ *, TH2
DTB = TH1 - T2
DTM = TH2 - T1
IF (DTB.LE.DTM) THEN
PRINT *, 'ERROR: DTB <= DTM'
GO TO 300
END IF
DT = (DTB - DTM) / LOG(DTB / DTM)
PRINT *, 'RESULTS:'
PRINT 200, 'DTB', DTB
PRINT 200, 'DTM', DTM
200 FORMAT(1X, A3, '=' ', F7.2)
PRINT 200, 'DT', DT
END

Для розробки комплексної моделі розрахунку мультіпаливного котельного агрегату в даному випадку пропонується дотриматися критеріальної оцінки. Тобто, цей засіб треба використовувати на усіх етапах розрахунку конструктивних елементів мультіпаливного котла (розрахунок топково-паливникового пристрою, розрахунок поверхонь нагріву та інше).

Наприклад, Розрахунок оптимальної конструкції топки котла оцінюється за даним критерієм:

$$|f(\vartheta_T'') - \vartheta_T''| \leq 100 \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (8)$$

де ϑ_T'' – показник температури продуктів спалення на виході з топки.

Модель за допомогою якої можна оцінити працездатність поверхонь нагрівання котла в першому приближенні може виглядати так:

$$\frac{\phi(I' - I'')}{k(I', I'', i', i'')H\Delta t(I', I'', i', i'')} \leq 0,02, \quad (9)$$

де I', I'' – показники ентальпії продуктів спалювання, відповідно, на вході і на виході на поверхню нагрівання, яка розраховується;

i', i'' – показники ентальпії робочого тіла, відповідно, на вході і на виході;

k – коефіцієнт теплопередачі;

H – площа поверхні нагрівання;

Δt – температурний напір.

При розробці найбільш оптимальної конструкції топки котла необхідно враховувати максимально можливі умови експлуатації. Наприклад, робота котла на суміші природного та доменного газу, при чому в різних процентних співвідношеннях за теплою.

На практиці, доволі часто, в рамках реконструкції котельного агрегату потрібно зробити не лише перехід на інший вид пального, але і підвищити його паропроодуктивність.

При проектуванні котла що до підвищення його паропроодуктивності, необхідно за допомогою інструментів моделювання перевірити надійність не тільки газоходу котла, але і всіх інших важливих конструктивних його вузлів. Наприклад, сепараційного пристрою котла. Як відомо, сепараційна система є важливою складовою теплогідравлічно-го процесу котельного агрегату.

У розрахунках внутрішньо барабанних сепараційних пристроїв котельного агрегату критерієм оцінки виступають значення швидкості пара при проходженні через елемент що розраховується. Як приклад можна розглянути один з етапів – розрахунок дірчастого стелі. Тут допускається значення (оптимальне) швидкості пара на вході в дірчасту (жалюзійну) стелю барабана котла в наступних межах, м/с:

$$W''_{\min} \leq W''_{\text{доп}} \leq W''_{\max}, \quad (10)$$

де W''_{\min} – мінімально рекомендований значення швидкості пара в отворах дірчастого стелі барабана котла, м/с;

W''_{\max} – максимально рекомендоване значення швидкості пара в отворах дірчастого стелі барабана котла, м/с;

$W''_{\text{доп}}$ – допустиме (оптимальне) значення швидкості пара в отворах дірчастого стелі барабана котла, м/с;

Дану нерівність можна уявити наступним чином:

$$W''_{\min} \leq \frac{D}{3,6\gamma'' p F_{\text{д.п.}}} \leq W''_{\max}, \quad (11)$$

де D – паропроодуктивність пара в барабані котла, т/год;

γ'' – питома вага насиченої пари в барабані котла, кг/м³;

p – тиск пари в барабані котла, кгс/см² (МПа);

$F_{\text{д.п.}}$ – площа прохідного перетину дірчастої стелі барабана, м².

В рівнянні (12) D , γ'' і p значення отримані з теплового розрахунку котельного агрегату. Параметр $F_{\text{д.п.}}$ в даному випадку, це конструктивна

характеристика елемента, що розраховується, варіація чисельного значення якого впливає на швидкість пара в отворах дірчастого стелі барабана котла. Тобто, змінюючи конструктивні характеристики дірчастої стелі барабана котла, можна прийти до оптимального значення швидкості пара в ньому. Роблячи, логічні перетворення можна отримати такий логічний взаємозв'язок:

$$\frac{D}{3,6\gamma'' W''_{\max}} \leq F_{\text{д.п.}} \leq \frac{D}{3,6\gamma'' W''_{\min}}, \quad (12)$$

Якщо $\frac{D}{3,6\gamma'' W''_{\max}} = R$, тоді

$$R \frac{1}{W''_{\max}} \leq F_{\text{д.п.}} \leq R \frac{1}{W''_{\min}}. \quad (13)$$

Площа дірчастої стелі:

$$F_{\text{д.п.}} = 10^{-6} kn \frac{\pi}{4} d_{\text{отв}}^2, \quad (14)$$

де $d_{\text{отв}}$ – діаметр отвору в одному дірчастому листі, мм;

k – кількість отворів в одному дірчастому аркуші, шт.;

n – кількість дірчастих листів, шт.

Якщо допустити, що величина залишається незмінною, то можна змодельовати взаємозв'язок значень k і n . У нашому випадку:

$$R10^6 \frac{1}{W''_{\max}} \leq kn \frac{\pi}{4} d_{\text{отв}}^2 \leq R10^6 \frac{1}{W''_{\min}}, \quad (15)$$

$$R10^6 \frac{4}{\pi} \frac{1}{d_{\text{отв}}^2} \frac{1}{W''_{\max}} \leq kn \leq R10^6 \frac{4}{\pi} \frac{1}{d_{\text{отв}}^2} \frac{1}{W''_{\min}}. \quad (16)$$

Якщо $R10^6 \frac{4}{\pi} \frac{1}{d_{\text{отв}}^2} = Z$, тоді

$$Z \frac{1}{W''_{\max}} \leq kn \leq Z \frac{1}{W''_{\min}}. \quad (17)$$

В результаті отримаємо перетворену нерівність:

$$Z \frac{1}{W''_{\max}} \frac{1}{k} \leq n \leq Z \frac{1}{W''_{\min}} \frac{1}{k}. \quad (18)$$

яке можна представити графічно рис. 2.

Тут область між двома гіперболами 1, 2 можна вважати оптимальною.

Як видно з рис. 2 при заданому значенні K можна визначити оптимальне значення n . В аналогічній формі можна уявити залежності і для інших елементів сепарації котла, за допомогою яких можна буде здійснювати моделювання їх конструкції. Загальна модель блок схеми програми розрахунку котельного агрегату з урахуванням конструкції його сепараційних пристроїв може мати такий вид рис. 3.

За використанням запропонованої структури були виконані тестові розрахунки, для котельного агрегату, що може працювати на газі нафтопереробки. Фрагмент результатів розрахунку наведено в табл. 2.

Таблиця 2 – Результати розрахунку

Найменування характеристики	Величини
Паропроодуктивність, т/год	35
Тиск перегрітої пари, МПа	1,4
Паропроодуктивність в барабані, т/год	41,36
Тиск пара в барабані, т/год	1,5
Питома вага насиченої пари, кг/м ³	6,743
Витрати палива, м ³ /год	2362
Діаметр отворів в дірчастому листі, мм	10
Кількість отворів в одному дірчастому листі, шт	90
Кількість дірчастих листів, шт	10

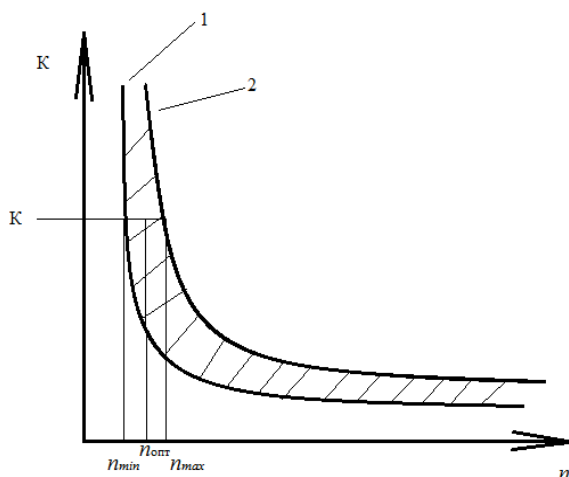


Рис. 2 – Визначення оптимального значення кількості дірчастих листів:

1 – гіпербола мінімуму, $Z \frac{1}{W_{\min}''} \frac{1}{k}$;

2 – гіпербола максимуму, $Z \frac{1}{W_{\max}''} \frac{1}{k}$

Висновки

Перспективним напрямком у вирішенні проблеми ефективного використання та споживання паливно-енергетичних ресурсів в енергетиці є використання мультіпаливних котельних агрегатів, які здатні працювати на спалюванні ВЕР, що виробляють на підприємствах, а також інші види палива, які можуть замінити природний газ. Для реалізації таких технічних рішень необхідна побудова різних розрахункових структурних моделей з яких можна буде обрати найбільш оптимальну, для ефективного використання її у проектуванні конструкцій мультіпаливних котельних агрегатів.

У даній статті наведено один з декількох варіантів напрямку побудови комплексної моделі теплогідравлічного розрахунку мультіпаливного котельного агрегата, який може працювати в складі ТЕС металургійного підприємства з урахуванням конструкції системи його сепарації. За результатами тестових розрахунків, можна зробити попередній висновок, проте що розроблений, та на

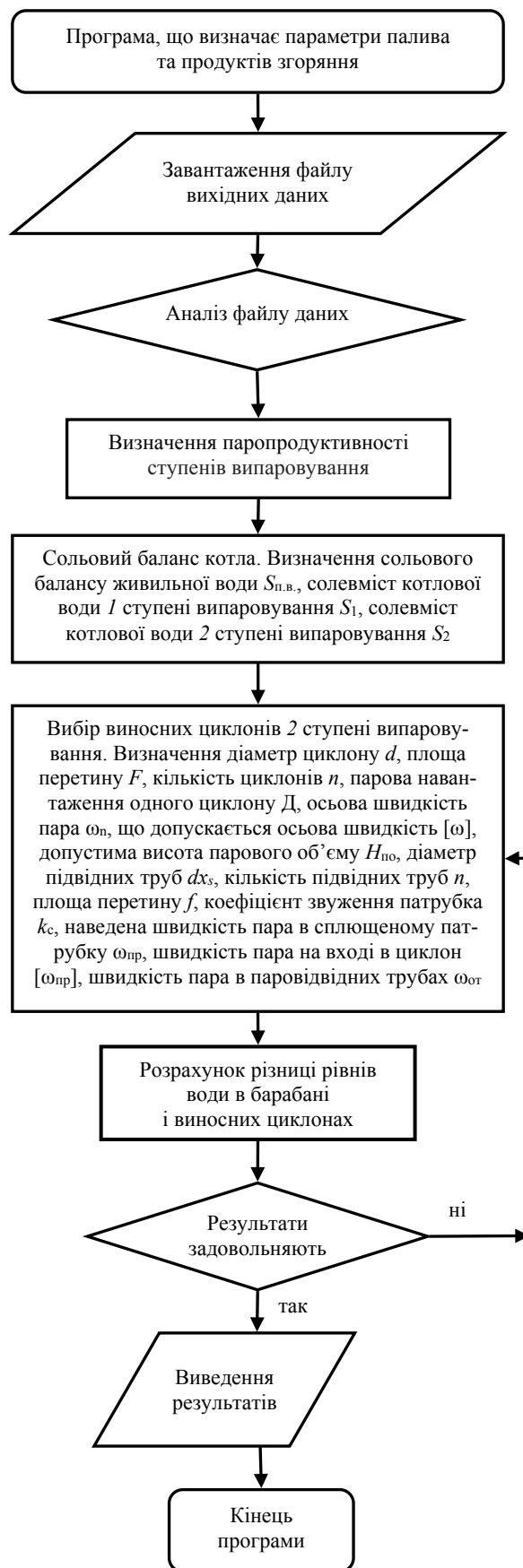


Рис 3 – Блок-схема програми розрахунку системи сепарації мультіпаливного котельного агрегату

ведений у даній статті варіант алгоритму і логіко-структурної схеми розрахунку може дозволити отримати більш оптимальні показники конструктивних і схемних рішень, що застосовуються для мультіпаливних котельних установок в умовах їх сучасного проектування та виготовлення. Крім того, на підставі отриманих попередніх результатів тестових розрахунків, можна вже говорити про перспективу створення комплексної програми розрахунку, яка охоплювала б усі основні та допоміжні елементи і вузли мультіпаливного котельного агрегату. Це в решті допоможе змодельовати оптимальну конструкцію мультіпаливного котла, здатного працювати на різних видах палива, в різних експлуатаційних режимах. Однак, це потребує внесення низки додатків та доопрацювань, що є темою подальших наукових досліджень в даному актуальному напрямі.

Список літератури

1. Кавертцев В. Л., Дягілев В. О. Обзор проблем эффективного использования топливно-энергетических ресурсов в промышленном секторе Украины та можливі оптимальні шляхи їх вирішення. *Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування*. Харків: НТУ «ХПІ», 2017. № 10(1232). С. 92–96. Бібліогр.: 4 назв. ISSN 2078-774X. doi: 10.20998/2078-774X.2017.10.13.
2. Левин М. М., Волковицкая П. И., Лаптин Ю. П. Система КРОКУС – автоматизированное проектирование, комплексные расчеты, оптимизация котельных установок. *Энергетика и Электрификация*. Киев, 2001. № 7. С. 45–48.
3. Бернадзеvский В. С. Математические модели – основа систем автоматизированного проектирования паровых котлов. *Теплоэнергетика*. Москва, 1997. № 9. С. 20–23.
4. Ефимов А. В., Меньшикова Е. Д., Аль-Тувайни Адель. Разработка имитационной модели котельной установки для автоматизированной системы управления и диагностики энергоблоков электростанций. *Вісник НТУ «ХПІ»*. 2001. № 7. С. 72–80.

5. Бернадзеvский В. С., Оскорбин Н. М. Основные положения теплового расчета паровых котлов на ЭВМ. *Теплоэнергетика*. Москва, 2002. № 8. С. 48–59.
6. *Тепловой расчет котельных агрегатов* : нормативный метод. Москва: Энергия, 1973. 296 с.
7. Сидельковский Л. Н., Юренев В. Н. *Котельные установки промышленных предприятий*. Москва: Энергоатомиздат, 1988. 588 с.

References (transliterated)

1. Kavertsev V. and Dyaghilev V. (2017), "Reviewing an Efficiency of the Use of Fuel and Power Resources for the Industry of Ukraine", *Bulletin of NTU "KhPI". Series: Power and heat engineering processes and equipment*, no. 10(1232), pp. 92–96, ISSN 2078-774X, doi: 10.20998/2078-774X.2017.10.13.
2. Levin M. M., Volkovitskaya P. I. and Laptin Y. P. (2001), *Sistema KROKUS – avtomatizirovannoe proektirovanie, kompleksnye raschety, optimizacija kotel'nyh ustanovok [CROCUS system – automated design, complex calculations, optimization of boiler plants]*, *Energitika i Elektrofikatsiya*, Vol. 7, pp. 45–48, Kyiv.
3. Bernadzhhevskiy V. S. (1997), "Matematycheskiye modely – osnova system avtomatyzirovannogo proektyrovaniya pervykh kotlov [Mathematical models are the basis of the systems for the automated design of feather boilers]", *Teploenergetika*, Vol. 9, pp. 20–23, Moscow.
4. Efimov A. V., Menshikova E. D. and Al-Tuvayni Adel. (2001), "Razrabotka imitacionnoj modeli kotel'noj ustanovki dlja avtomatizirovannoj sistemy upravleniya i diagnostiki jenergoblokov jelektrostancij [Development of a simulation model of a boiler plant for an automated control and diagnostic system for power units of power plants]", *Visnik NTU "KhPI"*, Vol. 7. pp. 72–80, Kharkiv.
5. Bernadzhhevskiy V. S. and Oskorbin N. M. (2002), "Osnovnyye polozenija teplovogo rascheta parovykh kotlov na EVM [The main provisions of the thermal calculation of steam boilers on a computer]", *Teploenergetika*, Vol. 8, pp. 48–50, Moscow.
6. Kuznetsov N. V. and Mitor V. V. (1973), *Teplovoj raschet kotel'nyh agregatov : normativnyj metod [Thermal calculation of boiler units. Normative method]*, Energiya, Moscow.
7. Sidelkovskiy L. N. and Yurenev V. N. (1998), *Kotel'nye ustanovki promyshlennyh predpriyatij [Boiler installations of industrial enterprises]*, Energoatomizdat, Moscow.

Надійшла (received) 12.02.2018

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Кавертцев Валерій Леонідович (Кавертцев Валерий Леонидович, Kavertsev Valerii) – кандидат технічних наук, доцент кафедри парогенераторобудування, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна, e-mail: kaverseff@gmail.com.

Дягілев Вадим Олександрович (Дягилев Вадим Александрович, Dyahiliev Vadym) – аспірант, кафедри парогенераторобудування, технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна, e-mail: dyaga.v@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6823-7221>.

Єсипенко Тетяна Олексіївна (Єсипенко Татьяна Алексеевна, Esipenko Tatyana) – науковий робітник кафедри парогенераторобудування, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна.