

**В. А. БЕЖАН, В. М. ЖИТАРЕНКО****МОДЕЛЮВАННЯ ТА АНАЛІЗ ПАРАМЕТРІВ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ КОТЛІВ  
СЕРЕДНЬОГО ТИСКУ ПРИ ВИКОРИСТАННІ СУМІШІ ПРИРОДНОГО  
ТА ДОМЕННОГО ГАЗІВ З УРАХУВАННЯМ ПРИСОСІВ ПОВІТРЯ**

Об'єктом даного дослідження є теплові та енергетичні характеристики котлів середнього тиску ТЕЦ-1, чотири котли ЦКТИ-75/39Ф-2-4 та два котли ТП-150-2. Всі котли працюють на загальний паровий колектор 32 атм, 420 °С. Паливо – суміш доменного і природного газів в співвідношенні 0,7–0,9 об'ємних часток. Характеристики доменного газу непостійні: істотно змінюється елементарний склад, вологість і запиленість доменного газу. Було розроблено алгоритм комплексного розрахунку характеристик котла та математична модель для оптимального розподілу навантажень. Були розраховані теоретичні обсяги продуктів згоряння, визначено ККД котла та витрати палива, розраховано основні елементи (топкова камера, фестони, пароперегрівач), спільний розрахунок хвостових поверхонь нагріву (водяний економайзер і підігрівач повітря) з уточненням температури відхідних газів та визначено нев'язку теплового балансу котлоагрегату. Було розраховано вплив надлишків повітря у вихідних газах від навантаження.

**Ключові слова:** теплоенергетична система, котли середнього тиску, присоси повітря, втрати тепла, розрахунок надлишків повітря.

**В. А. БЕЖАН, В. М. ЖИТАРЕНКО****МОДЕЛИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ ПАРАМЕТРОВ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ КОТЛОВ  
СРЕДНЕГО ДАВЛЕНИЯ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ СМЕСИ ПРИРОДНОГО  
И ДОМЕННОГО ГАЗОВ С УЧЕТОМ ПРИСОСОВ ВОЗДУХА**

Объектом данного исследования являются тепловые и энергетические характеристики котлов среднего давления ТЭЦ-1, четыре котла ЦКТИ-75/39Ф-2-4 и два котла ТП-150-2. Все котлы работают на общий паровой коллектор 32 атм, 420 °С. Топливо – смесь доменного и природного газов в соотношении 0,7–0,9 объемных долей. Характеристики доменного газа непостоянны: существенно меняется элементарный состав, влажность и запыленность доменного газа. Был разработан алгоритм комплексного расчета характеристик котла и математическая модель для оптимального распределения нагрузок. Были рассчитаны теоретические объемы продуктов сгорания, определены КПД котла и расхода топлива, рассчитаны основные элементы (топочная камера, фестоны, пароперегреватель), общий расчет хвостовых поверхностей нагрева (водяной экономайзер и подогреватель воздуха) с уточнением температуры отходящих газов и определены невязку теплового баланса котлоагрегата. Было рассчитано влияние излишков воздуха в уходящих газах от нагрузки.

**Ключевые слова:** теплоэнергетическая система, котлы среднего давления, присосы воздуха, потери тепла, расчет излишков воздуха.

**V. BEZHAN, V. ZHITARENKO****MODELING AND ANALYSIS OF ENERGY EFFICIENCY PARAMETERS OF MEDIUM  
PRESSURE BOILERS USING A MIXTURE OF NATURAL AND BLAST FURNACE GASES  
TAKING INTO ACCOUNT AIR INTAKES**

The object of this study are the thermal and energy characteristics of medium pressure boilers CHP-1, four boilers CCTI-75/39F-2-4 and two boilers TP-150-2. All boilers operate on a common steam collector 32 atm, 420 °C. Fuel is a mixture of blast furnace and natural gases in a ratio of 0.7–0.9 by volume. The characteristics of blast furnace gas are not constant: the elemental composition, humidity and dustiness of blast furnace gas change significantly. An algorithm for complex calculation of boiler characteristics and a mathematical model for optimal load distribution were developed. Theoretical volumes of combustion products were calculated, boiler efficiency and fuel consumption were determined, basic elements (furnace chamber, scallops, superheater) were calculated, joint calculation of tail heating surfaces (water economizer and air heater) with specification of exhaust gas temperature was determined and thermal balance was determined. The effect of excess air in the exhaust gases from the load was calculated. As a result of the analysis, the temperature of the exhaust gases was calculated, an indicator that characterizes the reliability and efficiency of the boiler, and the temperature at the outlet of the furnace, which characterizes the reliability of the superheater. The efficiency of the boilers was calculated and the value of the efficiency for the considered boilers was adjusted.

**Key words:** thermal power system, medium pressure boilers, air suction, heat loss, calculation of excess air.

**Вступ**

Розробляючи високоефективну енергосистему, фахівці все ширше застосовують потужні середовища моделювання у реальному або прискореному часі такі. Ці системи дозволяють визначити найенергоєфективніші режими елементів системи, параметри роботи, врахувати вплив різних зовнішніх факторів у терміновому розрізі. Системи моделювання у реальному часі дозволяють у

повній мірі врахувати системний ефект, який невідмінно виникає при взаємодії багатьох елементів системи. Фактично, жоден системний компонент, навіть найефективніший, не може самостійно визначити ефективність роботи всієї системи перетворення енергії. Коли система складається з великої кількості елементів, що мають певні пікові показники, необхідний більш системний, комплексний підхід до ефективності, який містить оптимізацію цілої системи. Основою будь-якого плану

© В. А. Бежан, В. М. Житаренко, 2020

оптимізації є добре розроблена системна інфраструктура, яка визначає ефективність всієї системи, та здебільшого не співпадає оптимальним функціонуванням окремих складових. Використання системного підходу допомагає інженерам не лише вибирати необхідні компоненти системи, але й визначати особливості властивостей системи в потрібний час – взаємодія системних елементів та поява нових властивостей, які можуть бути отримані з системи в операційному процесі. Це все стосується і теплоенергетичних систем, як великих штучних систем [1, 2].

Динамічні властивості енергетичних систем з точки зору вимоги швидкого і значного зміни навантаження, що є необхідною умовою участі в регулюванні потужності енергосистеми, визначаються головним чином динамічними властивостями котлоагрегату. Котел являє собою складну динамічну систему, що складається з елементів, що розрізняються між собою за призначенням, конструктивним виконанням, станом робочого тіла і т. п. Найбільш поширені котли з природною (барабанні) і примусової (прямоточні) циркуляцією.

Поділяючи процес виробництва і споживання пара на прості складові (підготовка і порціонування подачі палива; спалювання; передача тепла котельній воді через стінки труб, видача пара з циркуляційної системи в барабан котла; акумуляція тепла в котельній воді, парі і металі; видача пара на турбіну). Найбільший вплив на теплоакумулюючу здатність котла надає тепловміст води. Вплив маси металу становить близько 22–35 %. Динамічні властивості проміжних ділянок від паливopодаючих пристроїв до екранної системи залежать від їх конструкції і виду палива, що спалюється. Інерційність і запізнювання, що виникають при транспортуванні палива до пальників, необхідно враховувати, якщо паливо подається з шахтних млинів або з проміжних бункерів за допомогою пилососів. При спалюванні рідких і газоподібних палив подача палива в топку відбувається відразу ж слідом за переміщенням регулюючого органу. Запізнення по витраті або тиску пари, що враховує процеси спалювання палива, передачі тепла котельній воді через стінки труб і видачі пара з циркуляційної системи в барабан котла, в порівнянні з запізненням подачі палива в котел є несуттєвим. У зв'язку з усіма викладеними факторами розробка математичної моделі котла дозволить оцінити особливості теплообміну в топці при спалюванні доменного газу, а також реальні характеристики котлів на основі проведених експериментів.

### Мета роботи

Для приведення розрахункової математичної моделі котла у відповідність з параметрами пра-

цюючого обладнання необхідно визначити ряд поправочних коефіцієнтів на підставі результатів теплотехнічних вимірювань і випробувань котла.

Метою даної роботи є:

- розрахунок енергетичних характеристик котла та присосів повітря;
- розрахунок присосів в газовий тракт парогенератора;
- розробка алгоритму проведення розрахунку та реалізація моделі для котла ЦКТИ-75/39.

### Характеристики котлоагрегатів

Блок середнього тиску включає 4 котла ЦКТИ-75/39Ф-2-4 і 2 котла ТП-150-2. Всі котли працюють на загальний паровий колектор 32 атм, 420 °С. Паливо – суміш доменного і природного газів в співвідношенні 0,7–0,9 об'ємних часток. Характеристики доменного газу непостійні: істотно змінюється елементарний склад, вологість і запиленість доменного газу.

Специфічним умовами роботи котлів середнього тиску в умовах ТЕЦ-1 крім перерахованих вище є:

- робота котлів № 7–10 на індивідуальні димові труби, а двох ТП-150-2 – на загальну трубу;
- наявність в тепловій схемі ТЕЦ-1 перепускної турбіни протитиску Р-12 і паралельно включених резервних БРОУ між паропроводами гострого пара 100 атм і 32 атм;
- на котлах ЦКТИ-75/39Ф-2-4 і ТП-150-2 встановлені однотипні прямоточні плоскофакельні пальники (по дві), незважаючи на те, що продуктивності і обсяги топok розрізняються суттєво.

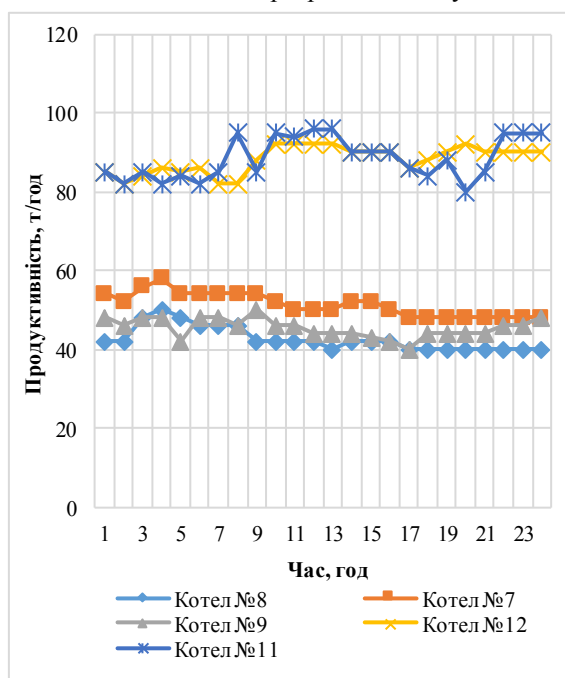


Рис. 1 – Зміна навантаження котлів протягом доби

Котел № 10 в даний час реконструйований заміною всіх поверхонь нагріву, обмуровки, приладів і автоматики. Це дозволяє можливість встановити характер зміни експлуатаційних характеристик котла в міру забруднення і зносу поверхонь нагріву.

На рис. 1 показані зміни продуктивності кожного з котлів. Характерний для котлів ЦКТИ і ТП загальний характер зміни навантаження протягом доби, пов'язаний зі змінною роботою. Загальний інтервал зміни продуктивності всіх котлів становить 30 т/год, тобто це той середній ресурс в межах якого можливо перерозподіл навантаження між котлами.

Розроблена математична модель котлів середнього тиску базується на нормативній методиці теплового [3] і аеродинамічного [4] розрахунків. Вона побудована за блоковим принципом з двома вкладеними циклами. Перший, внутрішній цикл – один прогін моделі – дозволяє розраховувати всі параметри роботи котла при заданих вихідних даних. Другий, проміжний цикл – дозволяє розраховувати сітку режимів роботи і визначати оптимальні параметри.

#### Розрахунок енергетичних характеристик котла та присосів повітря

Енергетична характеристика будь-якого котла у вигляді його залежності ККД від експлуатаційних та конструкційних параметрів може бути визначена декількома способами:

1 Аналітичним, в яких використовуються математичні залежності, що описують фізичні процеси у котлах: теплообмін, гідро- та аеродинаміку тощо.

2 Полуемпіричним – які для опису частки складних залежностей використовують емпіричні залежності.

3 Емпіричні, які повністю апроксимують результати аналітичних обчислень або натурних випробувань обладнання.

$$\eta_{\text{бр}} = 100 - q_2 - q_3 - q_4 - q_5, \quad (1)$$

де  $q_2$  – втрата теплоти з газами, що відходять;  $q_3$  – втрата теплоти з хімічним недопаленням;  $q_4$  – втрата теплоти з механічним недопаленням;  $q_5$  – втрата теплоти у навколишнє середовище.

З одного боку величина  $q_2$  в межах 40 %-ої зміни навантаження змінюється на 3–4 %, а величина  $q_5$  визначається як  $q_5 = q_n = f(D_n)$ , що відповідає абсолютній зміні втрат на 0,4–0,8 %. Практично в усіх випадках при нормальній експлуатації і своєчасних наладках величина втрат з хімічним недопаленням незначна або близька до нуля, тому у виразі (1) вважають  $q_3 = 0$  в усіх випадках.

Таким чином, ККД котла змінюється на 0,2 % в абсолютних одиницях. Проте результати численних випробувань дають інтервал значень зміни ККД 2–3 % в діапазоні 40 %-ої зміни навантаження відносно номінального. Це не може бути пояснено більш істотним впливом присосів до котла.

Величина втрат тепла з газами, що відходять може бути визначена:

$$q_2 = \frac{I_{\text{yx}} - \alpha_{\text{yx}} I_{\text{xb}}}{Q_{\text{H}}^{\text{p}}}, \quad (2)$$

де  $I_{\text{yx}}$  – ентальпія газів, що відходять;  $I_{\text{xb}}$  – ентальпія холодного повітря;  $Q_{\text{H}}^{\text{p}}$  – теплота згорання палива.

Також для визначення втрат тепла з газами, що відходять, використовують емпіричну формулу Пеккера [5]:

$$q_2 = (K\alpha_{\text{yx0}} + C) \left( t_{\text{yx0}} - \frac{\alpha_{\text{yx0}} t_{\text{xb0}}}{\alpha_{\text{yx0}} + B} \right) A_{10} K_Q \cdot 10^{-2}, \quad (3)$$

де  $C, K, A_{10}, K_Q, B$  – емпіричні коефіцієнти;  $\alpha_{\text{yx0}}, t_{\text{yx0}}, t_{\text{xb0}}$  – нормативні коефіцієнт надлишку повітря у газах, температури газів, що відходять, та холодного повітря.

Якщо плив режимів роботи котла на температуру газів, що відходять, можна обчислити за допомогою математичної моделі котла, то врахувати вплив присосів повітря дуже складно з-за безлічі невизначеностей.

Проблема погіршується тим, що розмір щілин у обмурівці та тиск у газоходах постійно. Основними експлуатаційними чинниками, що впливають на присоси холодного повітря в паровий котел є навантаження котла і його аеродинамічний режим. В умовах експлуатації котлів, наприклад, ТЕЦ металургійних заводів, коли спалюється кілька видів палива – основне паливо доменний газ, а природний – буферне, аеродинамічний режим котлів в істотній мірі залежить від баластних складових суміші газів. Присоси холодного повітря в котел залежать тільки від навантаження котла і його аеродинамічного режиму. Аналіз досліджень в цьому напрямку встановив загальну закономірність: зі зростанням навантаження котла присоси зменшуються.

Недостатня щільність котла є однією з головних причин його низької надійності і економічності. Через нещільності в топковій камері і газоходах котла, що працює під розрідженням, підсмоктується холодне повітря. Практика показує, що, в залежності від типу котла та складу суміші палив, збільшення присосів повітря в топку на 20 % знижує ККД котла більш ніж на 1 %, а збільшення присосів повітря в конвективну шахту котла на 10 % знижує його ККД приблизно на 0,6 %.

Коефіцієнт надлишку повітря у вихідних газах залежить від присосів в топку, конвективну шахту котла і прийнята у вигляді:

$$\alpha_{yx} = \alpha_r + \Delta\alpha_t + \Delta\alpha_k, \quad (4)$$

де  $\alpha_r$  – коефіцієнт надлишку повітря в пальниках;  $\Delta\alpha_t$  – присоси повітря в топку;  $\Delta\alpha_k$  – присоси повітря в конвективну шахту.

Присоси в топку при зміні навантаження парового котла рекомендується описувати формулою виду [6, 11]:

$$\Delta\alpha_t = \Delta\alpha_{t,ном} \frac{D_{ном}}{D}, \quad (5)$$

де  $\Delta\alpha_{t,ном}$  – присоси в топку при номінальному навантаженні  $D_{ном}$ .

Присоси в конвективну шахту при зміні навантаження котла рекомендується описувати формулою виду [3, 6]:

$$\Delta\alpha_k = \Delta\alpha_{k,ном} \sqrt{\frac{D_{ном}}{D}}, \quad (6)$$

де  $\Delta\alpha_{k,ном}$  – присоси в конвективну шахту при номінальному навантаженні  $D_{ном}$ ;  $\Delta\alpha_k$  – присоси в конвективну шахту при навантаженні  $D$ .

Формула (4) з урахуванням (5) та (6):

$$\alpha_{yx} = \alpha_r + \Delta\alpha_{t,ном} \frac{D_{ном}}{D} + \Delta\alpha_{k,ном} \sqrt{\frac{D_{ном}}{D}}. \quad (7)$$

Для визначення  $\Delta\alpha_{t,ном}$  та  $\Delta\alpha_{k,ном}$  можна скористатися результатами випробувань.

Наведемо невеликий приклад складання емпіричних залежностей, які враховують реальні присоси у паровий котел. У прикладі були використані результати випробувань парових котлів середнього тиску поширеного типу ЦКТИ-75-39Ф2 (Е-75-40) та котли ТП-150-2 (Е-150-10), які працювали у складі ТЕЦ металургійного комбінату[7].

Котельний агрегат ЦКТИ-75-39Ф2 одnobарабанний, вертикально-водотрубний з природною циркуляцією спроектований для спалювання твердого палива. Компонування котла ЦКТИ-75/39 виконано за П-подібною схемою, має дві ступені економайзера та дві ступені повітряпідігрівача. Топка котла частково зашита металевим листом. Підчас випробувань котли виробляли перегріту пару з тиском 35–36 кгс/см<sup>2</sup>, температуру 430–435 °С, продуктивність на доменно-природній суміші (93 %/7 %) не перевищувала 55 т/год.

У табл. 1 наведені середні значення  $\Delta\alpha_{t,ном}$  та  $\Delta\alpha_{k,ном}$  для котлів № 1–4 за умови, що  $\alpha_r = 1$ .

Для котла № 10 результати балансових випробувань відсутні, тому

$$\alpha_{yx} = 1,0 + 0,16 \frac{75}{D} + 0,19 \sqrt{\frac{75}{D}}. \quad (8)$$

Таблиця 1 – Експериментальні і розрахункові присоси повітря в топку і конвективну шахту

Котел	Топка та пароперегрівач		Конвективна шахта	
	$\Delta\alpha_{t,ном}$	По [6]	$\Delta\alpha_{k,ном}$	По [6]
№ 1	0,121	0,17	0,574	0,14
№ 2	0,176	0,17	0,38	0,14
№ 3	0,21	0,17	0,66	0,14
№ 4	–	0,17	–	0,14

Таблиця 2 – Залежність коефіцієнта надлишку повітря за димососом і температури відхідних газів від навантаження і теплової частки доменного газу (за результатами теплотехнічних випробувань котла № 7)

Навантаження котла, $D$ , т/год.	Теплова частка доменного газу, $q$	Коеф. надлишку повітря за димососом, $\alpha_{yx}$	Температура відхідних газів, $t_{yx}$
40	0,755	2,07	174
40	0,491	1,89	161
40	0,198	1,67	148
50	0,710	2,12	178
50	0,647	1,98	176
50	0,327	1,80	148
60	0,644	1,89	185
59	0,599	1,87	181
60	0,389	1,66	157

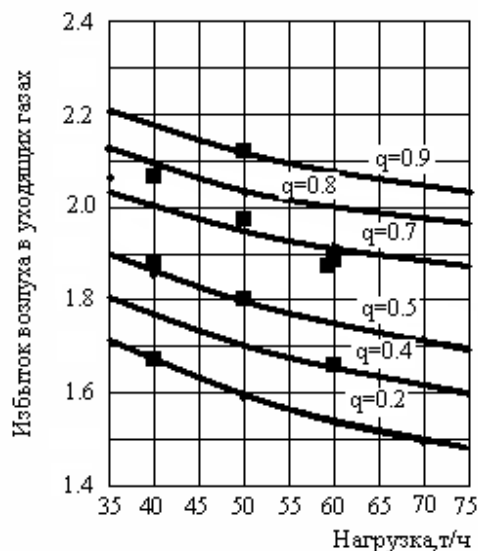


Рис. 2 – Залежність надлишку повітря у вихідних газах від навантаження  $D$  для котла № 1 при різних долях доменного газу  $q$

Результати теплових випробувань вказують, що надлишок повітря у вихідних газах істотно залежить від навантаження і теплової частки доменного газу в суміші палив (табл. 2).

Залежності, побудовані за результатами табл. 2 методом багатофакторного регресійного аналізу має вигляд:

$$\alpha_{yx} = 1,76 - 0,009D + 0,00004D^2 + 0,785q. \quad (9)$$

На рис. 2 показані залежності надлишку повітря у вихідних газах від навантаження для котла № 1 ЦКТИ-75/39Ф2 при різних частках доменного газу. Суцільні лінії відповідають рівнянням (9), а прямокутниками відзначені режими з балансових випробувань.

### Розрахунок присосів в газовий тракт парогенератора

$$\Delta\alpha_i = \frac{\mu F_0}{V^0 B} \sqrt{\frac{2}{\rho_B}} \sqrt{p_{\text{атм}} - p_{i-1} + \zeta_m \frac{\rho_r}{4} \left( \frac{B}{F_r} \frac{t_{\text{сп}} + 273}{273} \right)^2} \left( V_r^0 + 1,016 \left( \alpha_{i-1} - 1 + \frac{\Delta\alpha_i}{2} \right) V^0 \right)^2. \quad (10)$$

Отриманий вираз для розрахунку є рівняння в неявному вигляді, так як шукана величина входить в обидві частини виразу. Аналіз рівняння приводить до висновків, що присоси залежать від:

- температурного поля і поля тиску в котлі;
- хімічного складу палива;
- навантаження котлоагрегату;
- геометричних параметрів котла;
- розміру і форми отворів в обмуровці.

Використання безпосередньо отриманого рівняння важко через велику кількість невідомих (перш за все розміру отворів для протікання повітря) [8, 9]. Якщо при теплових випробуваннях котла розрахувати присоси повітря, проміряти розподіл температур і тисків по газовому тракту, стає можливим розрахувати величину характеризує розміри отворів для потоку повітря, добуток коефіцієнта витрати на площу нещільностей  $(\mu F_0)_i$ .

Для цього з певними за результатами теплових випробувань величинами присосів  $\Delta\alpha_i$  проводиться повний теплової та аеродинамічний розрахунок котлоагрегату з метою знаходження розподілу температур і тисків по газовому тракту (розподіл температур і тисків може бути отримано і експериментально) [10].

Величину нещільності  $(\mu F_0)_i$  визначимо за формулою:

$$(\mu F_0)_i = \Delta\alpha_i V^0 B \sqrt{\frac{\rho_B}{2(p_{\text{атм}} - p_{\text{эфф}})}}. \quad (11)$$

Отримані величини  $(\mu F_0)_i$  використовуються для розрахунку присосів при будь-яких складах палива на будь-яких навантаженнях.

При відомій величині  $(\mu F_0)_i$  розрахунок ведеться методом послідовних наближень.

1 Задаємося величинами  $\Delta\alpha_i$  (визначаються за результатами випробувань) та проводимо повний теплової та аеродинамічний розрахунок кот-

Присоси в газовий тракт парогенератора, що працює під розрядження, обумовлені наявністю нещільності в обмуровці, люках та ін. Величина присосів не є постійною, а залежить від навантаження котла, складу палива і інших чинників. Визначення точного значення присосів істотно впливає на точність всього теплового розрахунку математичної моделі. Застосовувана в математичній моделі методика розрахунку є універсальною: застосовувані залежності не залежать від роду палива, що спалюється і типу котла. Методика заснована на механізмі утворення присосів: русі повітря крізь нещільності в газоходах.

Вираз для розрахунку присосів повітря:

лоагрегату з метою визначення розподілу температур і тисків по газовому тракту.

2 Розраховуємо присоси по (10).

3 Проводимо знову повний теплової та аеродинамічний розрахунок з уточненням величини  $\Delta\alpha_i$  до тих пір, поки необхідне наближення буде досягнуто

$$|\Delta\alpha_i^{k-1} - \Delta\alpha_i^k| \leq \varepsilon,$$

де  $\varepsilon$  – точність обчислення  $\Delta\alpha_i$ .

### Розробка алгоритму проведення розрахунку

Розрахунок виконується методом послідовних наближень. Порядок розрахунку математичної моделі наступний (рис. 3).

а) Вводяться дані про котли, паливо та режими.

б) Розраховуються теоретичні обсяги продуктів згоряння.

в) Попередньо задаються значення температури відхідних газів, гарячого повітря, присосів в поверхнях нагріву.

г) Визначається ККД котла, витрата палива.

д) Розраховується топкова камера, фестони, пароперегрівача.

е) На підставі даних, отриманих при розрахунку пароперегрівача, визначається теплосприйняття парохолоджувача або температура перегріву.

ж) Розрахунок конвективного пучка для котла ТП-150.

з) Спільний розрахунок хвостових поверхонь нагріву (водяний економайзер і підігрівач повітря) з уточненням температури відхідних газів.

и) Знаходиться нев'язка теплового балансу котлоагрегату. При досягненні нев'язки теплового балансу величини меншою заданої точності (наприклад 0,5 %) теплової розрахунок закінчується. В іншому випадку з уточненими значеннями



Рис. 3 – Блок-схема математичної моделі котлів ЦКТИ-75/39Ф-2-4 и ТП-150-2

температур газів і гарячого повітря розрахунок повторюється з пункту (г).

к) Проводиться аеродинамічний розрахунок котла.

л) Уточнюється значення присосів повітря в газовий тракт котла. Що стосується відхилення присосів від прийнятого значення розрахунок повторюється з пункту г).

м) Розрахунок економічних показників роботи котла і виведення результатів.

Програма «Комплексний розрахунок котла» виробляє перевірений розрахунок кожної поверхні нагрівання на підставі рішення системи нелінійних рівнянь матеріального, теплового та гідравлічного балансів, в які закладені коефіцієнти описують реальні теплові потоки, аеродинамічний опір по газовому тракту і рух повітря через огорожувальні поверхні котла. Ці дані визначені на основі

теплових балансових випробувань котлів, індивідуальні для кожного агрегату і закладені в програму розрахунку.

Математична модель реалізована у вигляді програми в середовищі «MatLab». Для полегшення роботи з обчислювальним ядром математичної моделі розроблено графічний користувальницький інтерфейс. Висновок розрахункових даних і результатів розрахунку проводиться в .html форматі і може бути переглянутий за допомогою веб-браузера.

### Реалізація моделі для котла ЦКТИ-75/39

На етапі реалізації математичної моделі без додаткової адаптації до діючого устаткування можна розглянути якісні залежності одних режимних параметрів від інших.

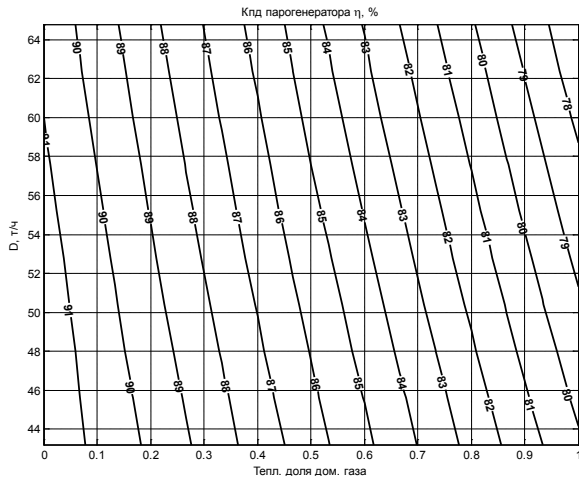


Рис. 4 – Залежність ККД котла ЦКТИ-75/39 від навантаження і теплової частки доменного газу

Температура газів на виході з топки

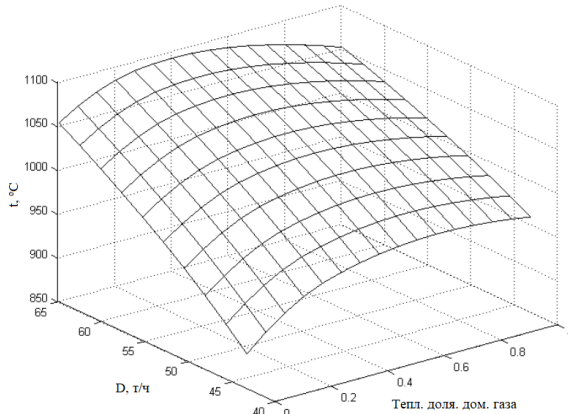


Рис. 6 – Залежність температури газів на виході з топки від навантаження і теплової частки доменного газу

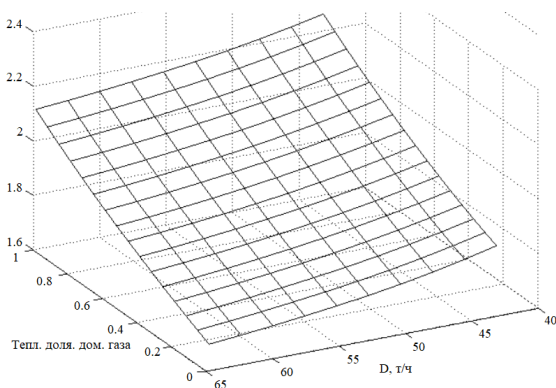


Рис. 8 – Залежність надлишку повітря у вихідних газах для котла ЦКТИ-75/39 від навантаження і теплової частки доменного газу

Метою будь-якого теплового розрахунку парогенератора є визначення його ККД. ККД котла ЦКТИ-75/39, що працює на суміші доменного та

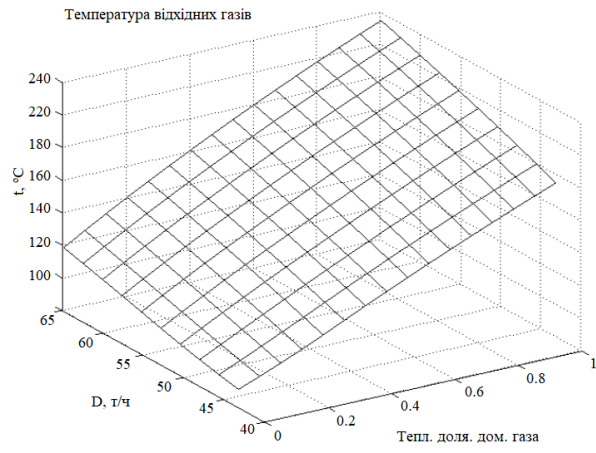


Рис. 5 – Залежність для котла ЦКТИ-75/39 температури відхідних газів від навантаження і теплової частки доменного газу

Температура гарячого повітря

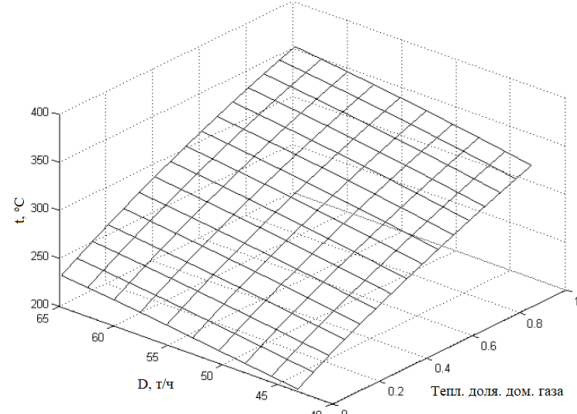


Рис. 7 – Залежність для котла ЦКТИ-75/39 температури гарячого повітря від навантаження і теплової частки доменного газу

природного газів, досягає максимальних значень при роботі тільки на природному газі.

Як видно з рис. 4, при спалюванні доменного газу ККД знижується і змінюється в діапазоні  $\eta = 78-91\%$ .

Температура відхідних газів – важливий показник, що характеризує надійність і економічність роботи котлоагрегату (рис. 5), а температура на виході з топки – надійність роботи пароперегрівача (рис. 6).

Коефіцієнт надлишку повітря на виході з котла зростає зі зменшенням навантаження (рис. 7, 8), так як в цих режимах обсяг продуктів згоряння найменший, а відповідно відносно значення присосів велике.

### Висновки

Результати аналізу аналітичних залежностей ККД від режимів роботи котла показали, що не всі залежності з достатнім ступенем точності можуть

бути описані діючими аналітичними методиками. Розбіжності особливо зростають при збільшенні невизначеності режиму роботи. Це пояснюється впливом баластних складових газів на променистий, конвективний теплообмін і аеродинаміку котлів за рахунок зміни присосів повітря. Теплотехнічні випробування показали, що надлишок повітря у вихідних газах істотно залежить від навантаження та складу палива.

Для діючих котельних агрегатів слід враховувати особливості впливу навантаження котлів на величину присосів в топці і конвективній шахті. Емпіричні залежності дозволяють врахувати особливості умов експлуатації котлів та з більшою долею вірогідності вирахувати величину присосів повітря та підвищити ефективність устаткування.

Розбіжність ККД становить +2,95 %...–0,57 % і пов'язано більше з особливостями розрахунку ККД згідно зі спрощеною методикою, яка застосовується при обробці даних випробувань. Граничне відхилення температури відхідних газів становить +20 °С...–11,6 °С.

#### Список літератури

1. Правила будови і безпечної експлуатації парових та водогрійних котлів. ДНАОП 0.00-1.08-94. Київ, 1998.
2. ГКД 34.09.151-94. Перегляд (розробка) енергетичних характеристик обладнання, порядок визначення нормативних питомих втрат та заощадження палива на енергопідприємствах. Положення. 1994.
3. Янкевич В. И. Наладка газомазутных промышленных котельных. Москва: Энергоатомиздат, 1988. 216 с.
4. Эколого-теплотехнические испытания котла ЦКТИ-75/39Ф-2-4 (ст. № 7–9) ТЭЦ-1 ОАО «ММК им. Ильича»: технический отчет. Мариуполь, 2001.
5. Трёмбовля В. И., Фингер Е. Д. Теплотехнические испытания котельных установок. Москва: Энергоатомиздат, 1991.
6. ПТП Укрэнергочермет. Инструкция по технологии контроля потерь тепла с уходящими газами и КПД энергетических агрегатов. Харьков, 1986.

7. Тепловые испытания котла ПК-14-2М Магнитогорского МК: технический отчет. Ленинград: ЦЭЧМ, 1988.
8. Nemitallah M. Boilers Optimal Control for Maximum Load Change Rate. *Journal of Energy Resources Technology*. 2014. No. 136. pp. 031301–031301. doi: 10.1115/1.4027563.
9. Трёмбовля В. И., Фингер Е. Д. Теплотехнические испытания котельных установок. Москва: Энергоатомиздат, 1991.
10. РД 34.09.155-93. Методические указания по составлению и содержанию энергетических характеристик оборудования тепловых электростанций. ОРГРЭС. 1999.
11. Аминов Р. З. Векторная оптимизация режимов работы электростанций. Москва: Энергоатомиздат, 1994. 304 с.

#### References (transliterated)

1. (1998), *Rules of construction and safe operation of steam and hot water boilers. ДНАОП 0.00-1.08-94*, Kiev.
2. (1994), HKD 34.09.151-94. Revision (development) of energy characteristics of equipment, the procedure for determining the regulatory specific losses and fuel savings at energy companies. Provision.
3. Jankelevich V. I. (1988), *Adjustment of gas-oil industrial boiler rooms.*, Jenergoatomizdat, Moscow, 216 p.
4. (2001), *Ecological and thermal tests of the boiler CKTI-75/39F-2-4 (st. № 7–9) TJeC-1 ОАО "Illich Steel and Iron Works": Technical Report.* Mariupol'.
5. Trembovlja V. I., Finger E. D. (1991), *Thermal tests of boiler installations.*, Jenergoatomizdat, Moscow.
6. PTP Ukrjenergochermet (1986), *Instruction on the technology of control of heat losses with exhaust gases and efficiency of power units.*, Kharkiv.
7. (1988), *Thermal tests of the boiler PK-14-2M of the Magnitogorsk MK: technical report.*, CJChM, Leningrad.
8. Nemitallah, M. (2014), "Boilers Optimal Control for Maximum Load Change Rate", *Journal of Energy Resources Technology*, no 136, pp. 031301–031301, doi: 10.1115/1.4027563.
9. Trembovlja V. I., Finger E. D. (1991), *Thermal tests of boiler installations.* Jenergoatomizdat, Moscow.
10. (1999), *RD 34.09.155-93. Methodical instructions on drawing up and the maintenance of power characteristics of the equipment of thermal power plants.* ORGRJeS
11. Aminov R. Z. (1994), *Vector optimization of power plant operation modes.*, Jenergoatomizdat, Moscow, 304 p.

Надійшла (received) 18.10.2020

#### Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Бежан Володимир Андрійович (Бежан Владимир Андреевич, Bezhan Vladimir)** – кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри промислових теплоенергетичних установок та теплопостачання, Приазовський державний технічний університет, вул. Університетська 7, м. Мариуполь, Україна, 87500, e-mail: azovbis@ukr.net, тел.: 096-589-99-77, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2869-904X>.

**Житаренко Володимир Михайлович (Житаренко Владимир Михайлович, Zhitarenko Vladimir)** – старший викладач кафедри промислових теплоенергетичних установок та теплопостачання, Приазовський державний технічний університет, вул. Університетська 7, м. Мариуполь, Україна, 87500, e-mail: ostapenkosc@gmail.com, тел.: 066-063-43-11, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5355-5323>.