

О. В. ЄФІМОВ, д-р техн. наук, проф. НТУ «ХП»;

О. Д. МЕНЬШИКОВА, канд. техн. наук, доц. НТУ «ХП»;

В. Л. КАВЕРЦЕВ, канд. техн. наук, доц. НТУ «ХП»

КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ КОТЛІВ-УТИЛІЗАТОРІВ ПАРО- І ГАЗОТУРБІННИХ УСТАНОВОК

Розглянуто математичну модель розрахунку парового котла-утилізатора ГТУ. Подані логіко-структурна блок-схема математичної моделі та ітераційний алгоритм розрахунку. Розроблений комплекс програм призначений для проведення теплових розрахунків парових котлів-утилізаторів будь-якої конструктивної схеми на різних навантаженнях і видах палива.

Рассмотрена математическая модель расчета парового котла-утилизатора ГТУ. Представлены структурная блок-схема математической модели и итерационный алгоритм расчета. Разработанный комплекс программ предназначен для проведения тепловых расчетов паровых котлов-утилизаторов любой конструктивной схемы на разных нагрузках и видах топлива.

The simulator steam boiler- utilizer considered is this article. The logical-structural scheme of mathematical model and the generalized iterative algorithm of steam boiler-utilizer calculation are submitted. The program-realizing algorithm of calculation is described.

Висока енергоємність і залежність економіки України від значних обсягів традиційного органічного палива, імпортованого за цінами світового рівня (газу – 44%, нафти – 17%, вугілля – 22%) для потреб енергетики, складна екологічна ситуація в країні, виснаження (у не дуже віддаленій перспективі) запасів всіх видів викопного палива ускладнюють енергетичну ситуацію в державі. Це, у свою чергу, викликає необхідність здійснення планомірної державної політики по енергозбереженню у всіх сферах суспільного виробництва України.

Багатьма фахівцями та вченими обґрунтовуються можливість збереження традиційних енергетичних ресурсів за рахунок впровадження технологій, у яких виробляється електрична та тепла енергія. В основному серед таких технологій розглядаються можливості когенерації при використанні газо- і паротурбінних установок. Сьогодні розроблені технології загального виробництва теплової й електричної енергії, які здатні не тільки задовольнити як більших, так і дрібних споживачів, але й значно рентабельніші, чим паротурбінні технології, які застосовуються сьогодні на підприємствах і ТЕЦ.

Звичайно технологія когенерації реалізується за допомогою газотурбінної установки (ГТУ) простого типу, у якій після газової турбіни встановлений котел-утилізатор. У ньому за рахунок залишкової теплоти відпрацьованих газів генерується пара або одержують гарячу воду, які використовуються для технологічних потреб виробництва або теплофікаційних потреб. Друга технологія спільного виробництва електричної та теплової енергії, що стає

усе більше розповсюдженої в усьому світі, – газопарова технологія. Реалізується вона бінарної газо- паротурбіною установкою з паротурбінним теплоутилізаційним контуром, з якого основну частину зробленої пари подають на парову турбіну, пов'язану з електрогенератором, і при необхідності відбирають частину пари на теплофікаційні потреби.

Більше половини електростанцій, які будуються сьогодні у світі, будуть працювати по бінарному циклу, оскільки ККД установок бінарного циклу перевищив 55%, а одинична потужність установки може бути більше 500 МВт. Витрата палива майже вдвічі менша, чим у паротурбінних блоків, які зараз експлуатуються.

Увесь цей процес модернізації теплоенергетики, що спостерігається в індустріально розвинених країнах, є надзвичайно актуальним і для економіки та енергетики України. Тому когенерація, як одна з найбільш ресурсозберігаючих технологій, повинна займати визначальне місце в державній програмі підвищення енергоефективності і в першу чергу – в зв'язку з проблемою зменшення обсягів споживання країною природного газу. Впровадження когенераційних технологій має наслідком пряме скорочення обсягів газу, що споживався підприємством, зменшення витрат на енергоносії і зменшення собівартості продукції.

Роботи із проектування таких установок, а також по модернізації і реконструкції вже існуючих котельних установок, припускають рішення складних технічних завдань у вигляді виконання різноманітних розрахунків для визначення оптимальних характеристик котельного встаткування. Ці технічні завдання можуть бути вирішені на основі широкого використання сучасної обчислювальної техніки, систем і методів автоматизованого проектування.

Відомо, що автоматизоване проектування є дуже актуальним, що стрімко розвивається напрямком науково-технічного прогресу, оскільки дозволяє істотно скоротити строки розробки нових казанів і модернізації експлуатованих, підвищити їхню якість шляхом оптимізації конструкцій і режимів експлуатації.

Основу існуючих САПР котельних установок становлять математичні моделі теплових розрахунків і їхні комплекси, що реалізують, програм, що включають у себе сучасні методи багатofакторної оптимізації [1].

У цей час розроблено досить багато версій моделей і програм теплових розрахунків котлів різних типорозмірів [1–8]. Ці математичні моделі й 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 описана розроблена математична модель теплового розрахунку парового котла-утилізатора, що працює в складі газотурбінної установки або парогазотурбінної установки. Алгоритм і логіко-структурна схема моделі дозволяють робити розрахунок усього різноманіття елементів і

схемних рішень, застосовуваних для котлів-утилізаторів в умовах сучасного проектування і виготовлення.

При моделюванні були зроблені наступні допущення:

формули для визначення величин узяті з [9];

гази, використовувані в котлах-утилізаторах чисті без часточок золи;

склад газів близький до складу повітря, тому при обчисленні коефіцієнтів теплопровідності, в'язкості й критерію Прандтля застосовувалися програми інтерполяції табличних даних [9] для повітря;

з моделі виключені розрахунки повітропідігрівників тому що в КУ за ГТУ вони відсутні.

Логічна блок-схема моделі теплового розрахунку котла-утилізатора представлена на рис. 1. Реалізований у моделі алгоритм складається з 4-х ієрархічних рівнів:

1-й рівень – керуюча програма;

2-й рівень – програми розрахунку теплового балансу котлів-утилізаторів, що працюють у режимах утилізації тепла газів за газовою турбіною або в режимі з підтопом ;

3-й рівень – програми розрахунку основних конструктивних елементів;

4-й рівень:

4.1 – програми розрахунку термодинамічних і теплофізичних параметрів теплоносіїв і робочих середовищ (води, пари, повітря й димових газів);

4.2 – програми розрахунку коефіцієнтів тепловіддачі для нагрівних, випарних і пароперегрівних поверхонь для умов променистого теплообміну в газових потоках і для конвективного теплообміну. У програмах ураховується характер обтікання – подовжній або поперечний, тип поверхні – гладка або оребрена, тип пучка труб – коридорний або шаховий, робоче середовище – повітря, димові гази, вода, пара;

4.3 – програма розрахунку коефіцієнтів теплопередачі для різних теплообмінних поверхонь;

4.4 – програма розрахунку температурного напору для випадків прямого теплоносіїв, протитоку, послідовно-змішаного, паралельно-змішаного і перехресного струмів;

Керуюча програма в автоматизованому діалоговому режимі будує структуру теплової схеми котла, організовує обчислювальний процес і вводить вихідні дані, необхідні для роботи всього комплексу програм і розрахунку окремих елементів котла.

При моделюванні котла-утилізатора використовується великий перелік вихідної інформації. Для зручності користувача вся вихідна інформація компонується по технологічному принципі, що полегшує її підготовку. Ця інформація компонується у вигляді файлів і передається як вихідні параметри в програми, оформлені як процедури. Всі файли, що містять інформацію, постачені коментарями.

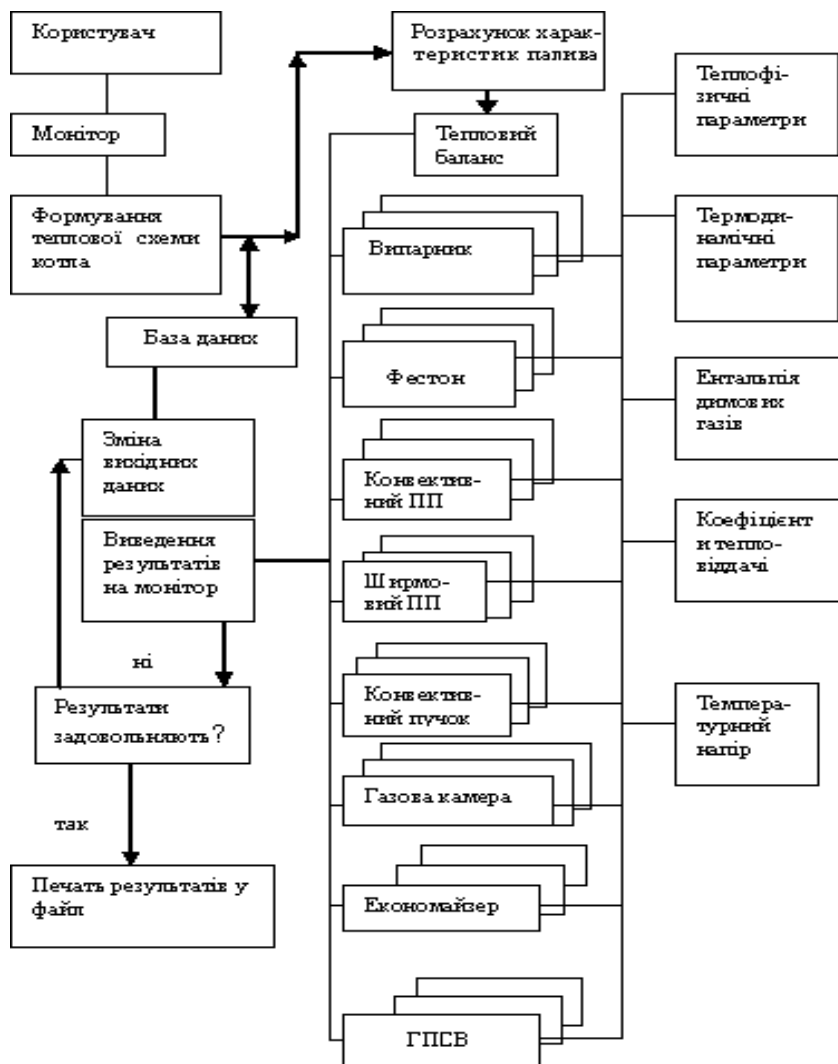


Рис. 1 – Логічна блок-схема теплового розрахунку котла-утилізатора ГТУ

Вихідною інформацією для теплового розрахунку котла-утилізатора є: значення витрати палива, паропродуктивності, об'єму і температури продуктів згоряння на вході в котел, температури відхідних газів, температури та тиску перегрітої (насиченої) пари, температури і тиску

живильної води, склад димових газів, відсоток продувки, наявність, тип і теплосприйняття пароохолодників.

Вихідною інформацією для розрахунків параметрів нагрівальних, випарних і пароперегрівних поверхонь є їхні геометричні характеристики: діаметр труб і їхня товщина; кроки труб; тип пучка – коридорний або шаховий. Крім того, як вихідна інформація використовуються коефіцієнти використання й теплової ефективності, а також характер взаємного руху потоків теплоносіїв і робочих тіл.

Програми розрахунку теплового балансу котла містять у собі розрахунки обсягів газоподібних продуктів згоряння, об'ємних часток трьохатомних газів, ентальпії газу на вході в котел, значень корисної теплоти, ентальпії відхідних, втрат теплоти, ККД котла, кількості виробленої перегрітої пари. Крім цього, розраховується таблиця значень ентальпій димових газів для заданих значень коефіцієнтів надлишку повітря та розрахункового температурного діапазону газів 0 – 2000 °С із інтервалом температур 100 °С.

Блок-схема алгоритму програми розрахунку теплового балансу котла наведено на рис. 2.

Вихідними даними для розрахунку котла-утилізатора є витрата природного газу на газову турбіну, кг/с; паропроодуктивність, кг/с, витрата димових газів на вході в котел, м³/с; температура газів на вході в котел, °С; температура відхідних газів, °С; температура перегрітої пари, °С; тиск перегрітої пари, МПа; температура живильної води, °С; температура холодного повітря, °С; вміст палива: води, %; двоокису вуглецю, %; сірководню, %; кисню, %; метану, %; етану, %; пропану, %; бутану, %; пентану, %; бензолу, %; азоту, %; вологовміст, г/м³; теплота згоряння палива, кДж/м³; частка продувки, %; установка пароохолодника – ПО відсутній; – ПО встановлено перед КПП, – ПО встановлено в розтин між 2 частинами КПП; – ПО встановлено після КПП; теплосприйняття пароохолодники, кДж/кг; тип ПО задається ознакою, якщо пароохолодник, що впорскує, то k_po=1, якщо пароохолодник поверхневий, то k_po=2; втрати від хімічного недопалювання, %; втрати від зовнішнього охолодження, %; модель враховує – задано об'ємну витрату й склад газів перед КУ чи задано витрату й склад природного газу перед ГТУ. Крім того, модель враховує працює котел з підтопом чи котел працює в режимі утилізації; масова витрата газів після ГТ, кг/с; надлишок повітря в ГТУ; витрата води через газовий підігрівник, температура води на вході в ГП, °С; температура води на виході із ГП, °С.

Програми розрахунків конструктивних елементів котла містять у собі розрахунки елементів із прямоточним, протиточним або складним взаємним рухом теплоносіїв і робітничих середовищ для конвективного та ширмового пароперегрівників, водяного економайзера (у тому числі з ділянкою кипіння), повітропідігрівника, випарника, конвективного пучка, фестона, газового підігрівника сітьової води й екранів газових камер.

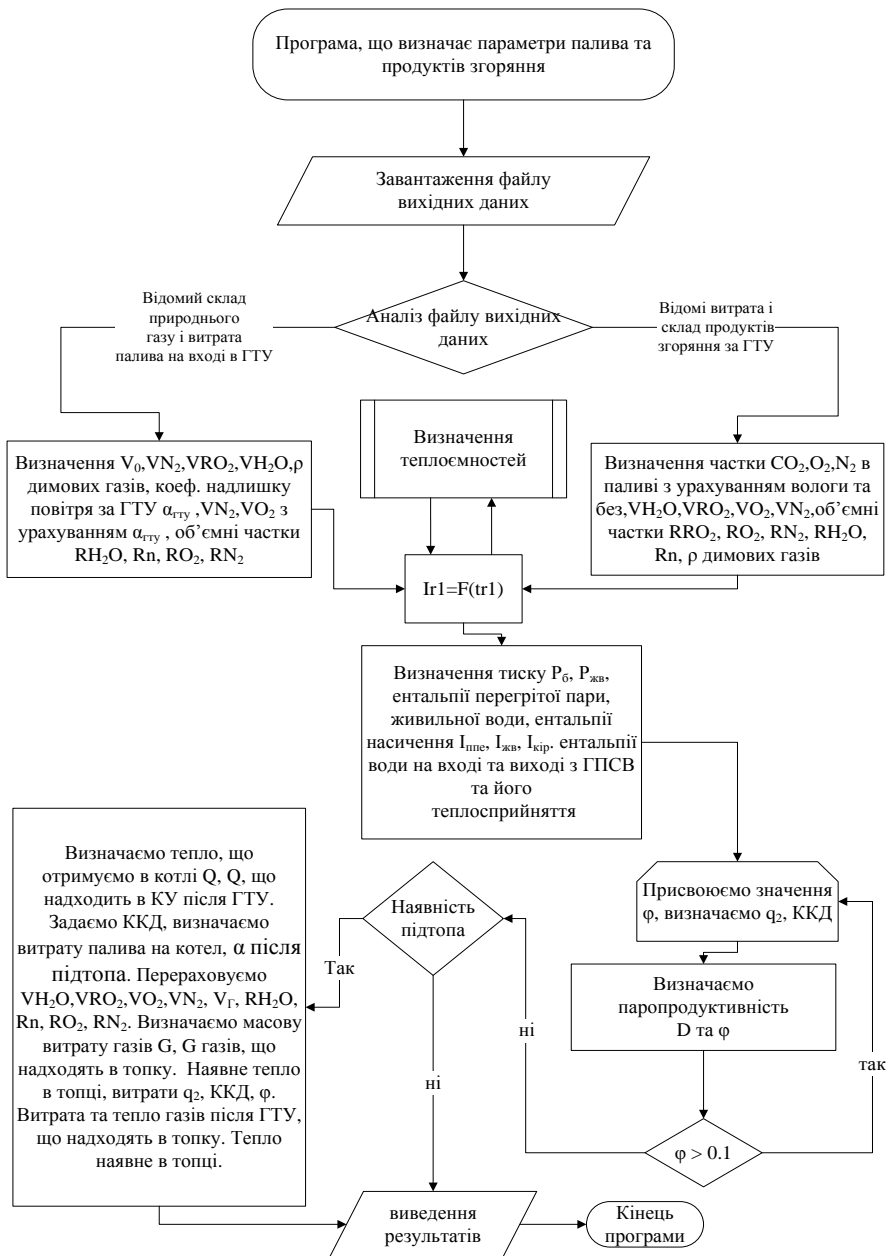


Рис. 2 – Блок-схема алгоритму програми розрахунку теплового балансу котла

Ці програми дозволяють по заданих параметрах, типу взаємного руху теплоносіїв і робітничих середовищ на вході в елемент, по типі теплообміну, по характеристиках поверхонь нагрівання визначити параметри теплоносіїв і робітничих середовищ на виході з елемента. Алгоритми розрахунків відповідають нормам теплового розрахунку котлів [9].

Процес розрахунку здійснюється у вигляді послідовних ітерацій. Він закінчується, коли розрахункова різниця теплосприйняття поверхонь стає менше заданої величини. Ця величина становить, як правило, для екранів газових камер і додаткових поверхонь 10 %, а для ширмових поверхонь, конвективних пучків, пароперегрівників, випарників, водяних економайзерів і повітропідігрівників – 2%. Відносна погрішність теплового балансу всього котла не повинна перевищувати 0,5%.

Кількість типів поверхонь, що розраховуються, теплообміну визначається існуючим досвідом конструювання котлів-утилізаторів [10-13].

Пакет програм для розрахунків термодинамічних і теплофізичних властивостей теплоносіїв і робітничих середовищ є складовою частиною програм 4-го рівні логічної структури моделі. Він призначений для апроксимації й інтерполяції значень таблиць термодинамічних і теплофізичних параметрів води, водяної пари [14], повітря й димових газів [9], кривих (наприклад, рис. 3) значень шуканих параметрів. До складу цього пакета входять більше 50 програм.

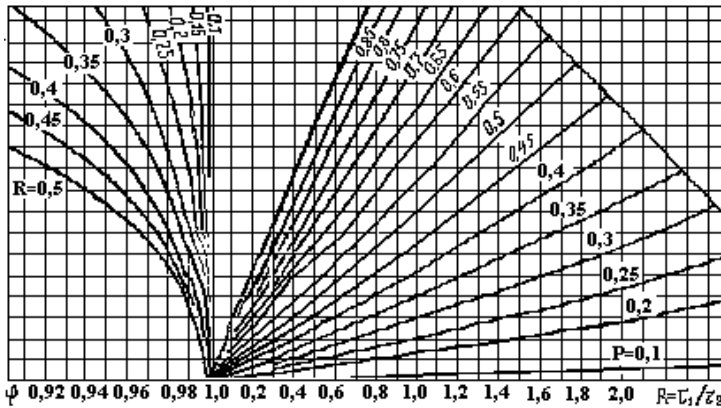


Рис. 3 – Номограма для определения температурного напора

Програми термодинамічного розрахунку параметрів води й водяної пари визначають: значення тиску по температурі та значення температури по тиску на лінії насичення; значення тиску, температури й ступені сухості пари по ентропії й ентальпії; значення питомих об'ємів, ентропії й ентальпії води й пара по тиску й температурі; значення температури води по тиску й ентальпії; значення температури й ступеня сухості пари по тиску й ентальпії; значення

ентальнії пари по тиску й ентропії. Вони застосовні для областей докритичного тиску.

Програми розрахунків теплофізичних параметрів води й водяної пари визначають значення коефіцієнтів динамічної й кінематичної в'язкості, теплоємності, критерію Прандтля. Вони застосовні для розрахункових тисків від 0,1 до 40 МПа й температур від 0 °С до 700 °С, а також на лінії насичення. Програми розрахунків теплофізичних параметрів для повітря визначають значення критерію Прандтля, коефіцієнтів кінематичної в'язкості й теплопровідності. Вони застосовні в діапазоні температур 0 – 2300°С. Програми розрахунків термодинамічних і теплофізичних параметрів для димових газів визначають: значення температур – по ентальпіям, коефіцієнтів теплоємності – по температурах, критерії Прандтля, коефіцієнти кінематичної в'язкості й теплопровідності. Вони застосовні для температур, що лежать у діапазоні 0–2300 °С. Для димових газів, що мають склад, відмінний від середнього, для діапазону об'ємних часток водяних парів у них $r_{H_2O} = 0 - 0,29$ ураховуються відповідні відхилення коефіцієнтів кінематичної в'язкості, теплопровідності та критерію Прандтля. Робота програмного комплексу починається з формування розрахункової теплової схеми котла-утилізатора. Із цією метою вводиться число теплообмінних поверхонь, розташованих по ходу газів, і число елементів по ходу робочого середовища (води, пароводяної суміші й пари). Потім у діалоговому режимі, відповідно до обраної схеми котла, задаються типи теплообмінних поверхонь, розташовуваних одна за одною. Як ми вже відзначали, розроблена математична модель припускає розрахунок наступних типів поверхонь: екрани газової камери, фестони, ширмові й конвективні пароперегрівники, випарники різних конструкцій, водяні економайзери. Для пароводяного тракту барабанних котлів до цього переліку додається барабан.

Після автоматизованого формування теплової схеми котла-утилізатора виконується його тепловий розрахунок в ітераційному режимі. Кількість ітерацій при коректному завданні вихідних даних становить 3 – 4. Одержувані результати для зручності конструктора-проектувальника оформлені у вигляді таблиці заданих у якості вихідних даних параметрів, результатів розрахунку теплового балансу й таблиць значень теплових і конструктивних характеристик, певних для всіх поверхонь нагрівання. Розроблений комплекс програм призначений для проведення теплових розрахунків парових котлів-утилізаторів за ГТУ будь-якої конструктивної схеми для газоподібного палива.

Список літератури: 1. *Левин М. М.* Система КРОКУС – автоматизированное проектирование, комплексные расчеты, оптимизация котельных установок / *М. М. Левин, П. И. Волковицкая, Ю. П. Лаптин и др.* // Энергетика и Электрификация. – 2001. № 7. – С. 45–48.
2. *Бернаджевский В. С.* Математические модели – основа систем автоматизированного проектирования первых котлов / *В. С. Бернаджевский* // Теплоэнергетика. –1997. № 9. – С. 20–23.

3. *Бернаджевский В. С.* Основные положения теплового расчета паровых котлов на ЭВМ / *В. С. Бернаджевский, Н.М. Оскорбин* // Теплоэнергетика. – 2002. № 8. – С. 48–50.
4. *Виленский Т. В.* Тепловые конструкторские расчеты поверхностей нагрева парогенератора на ЭВМ / *Т. В. Виленский* // Изв. вузов. Энергетика. – 1978. № 9. – С. 99–103.
5. *Хорьков Н. С.* Пакет программ для моделирования парового котла на ЭВМ третьего поколения / *Н. С. Хорьков, Н. Д. Михайкина, Т. Б. Сизова* // Теплоэнергетика. – 1981. – № 9. – С. 45–48.
6. *Терентьев В. Д.* ППП для теплового расчета котлов-утилизаторов и энерготехнологических котлов / *В. Д. Терентьев, Ю. Н. Кузнецов, Б. Я. Певзнер, А. А. Костюченко* // Труды ЦКТИ. – 1984. Вып. 210. – С. 72–74.
7. *Безгрешнов А. Н.* Блок-схема расчета тепловых схем барабанных котлов / *А. Н. Безгрешнов, Е. М. Шукин, Б. Н. Шлейфер* // Теплоэнергетика. – 1983. № 5. – С. 26–28.
8. *Ефимов А. В.* Разработка имитационной модели котельной установки для автоматизированной системы управления и диагностики энергоблоков электростанций / *А. В. Ефимов, Е. Д. Меньшикова, Адель Аль Тувайни* // Вестник НТУ “ХПИ”. – 2001. – Вып. 7. – С. 72–78.
9. *Тепловой расчет котельных агрегатов: Нормативный метод.* – М. : Энергия, 1973. – 296 с.
10. *Воинов А. П.* Котлы-утилизаторы и энерготехнологические агрегаты / *А. П. Воинов, В. А. Зайцев, Л. И. Куперман, Л. Н. Сидельников.* – М. : Энергоатомиздат, – 1989. – 270 с.
11. *Воинов А. П.* Паровые котлы на отходящих газах // *А. П. Воинов, Л. И. Куперман, С. П. Сушон.* – К. : Вища школа, – 1983. – 176 с.
12. *Котлы-утилизаторы и котлы энерготехнологические. Отраслевой каталог.* – М. : ЦНИИТЭИТяжмаш, – 1990. – 124 с.
13. *Куперман Л. И.* Вторичные энергоресурсы и энерготехнологическое комбинирование в промышленности // *Л. И. Куперман, С. А. Романовский, Л. Н. Сидельковский.* – К. : Вища школа, – 1986. – 279 с.
14. *Ривкин С. Л.* Термодинамические свойства воды и водяного пара // *С. Л. Ривкин, А. А. Александров.* – М. : Энергия. – 1975. – 78 с.

Надійшла до редколегії 05.02.2012