

Міністерство освіти і науки, молоді та спорту України
Вінницький національний технічний університет

Д. В. Степанов, Л. А. Боднар

**ЕНЕРГЕТИЧНА ТА ЕКОЛОГІЧНА
ЕФЕКТИВНІСТЬ ВОДОГРІЙНИХ КОТЛІВ
МАЛОЇ ПОТУЖНОСТІ**

Монографія

Вінниця
ВНТУ
2011

УДК 621.18

ББК 31.391

С 79

Рекомендовано до друку Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України (протокол № 10 від 26.05.2011 р.)

Рецензенти:

С. Й. Ткаченко, доктор технічних наук, професор

І. І. Пуховий, доктор технічних наук, професор

Степанов Д. В.

С79 Енергетична та екологічна ефективність водогрійних котлів малої потужності : монографія / Д. В. Степанов, Л. А. Боднар. – Вінниця : ВНТУ, 2011. – 148 с.

ISBN 978-966-641-437-6

В монографії розглянуті питання підвищення ефективності водогрійних котлів малої потужності. Розроблено математичну модель водогрійного котла малої потужності на традиційних та альтернативних паливах. Проведені дослідження інтенсифікації теплообміну в трубних пучках котлів дозволили виявити ефективні конструкції інтенсифікаторів.

Розроблена система оцінки ефективності котлів малої потужності на основі методології оцінки життєвого циклу виробу, що дозволяє комплексно враховувати енергетичні, екологічні та масогабаритні показники котла.

УДК 621.18

ББК 31.391

ISBN 978-966-641-437-6

© Д. Степанов, Л. Боднар, 2011

ЗМІСТ

ПЕРЕДМОВА	5
РОЗДІЛ 1. ВОДОГРІЙНІ КОТЛИ МАЛОЇ ПОТУЖНОСТІ.....	6
1.1. Сучасний стан розробки водогрійних котлів малої потужності..	6
1.2. Котли, що працюють на альтернативних видах палива	8
1.2.1. Систематизація інформації про котли на твердому паливі ..	11
1.3. Конструктивні ознаки водогрійних котлів на газовому паливі.....	14
1.4. Рекомендації з проектування водогрійних котлів малої потужності.....	17
РОЗДІЛ 2. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕПЛОВИХ ТА АЕРОДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ В ЕЛЕМЕНТАХ КОТЛІВ МАЛОЇ ПОТУЖНОСТІ	21
2.1. Сучасні методики теплового і аеродинамічного розрахунку опалювального обладнання малої потужності	21
2.2. Принципи розробки математичної моделі	24
2.3. Особливості розрахунку теплообміну в топці.....	26
2.4. Математичне моделювання інтенсифікованого теплообміну в газотрубному пучку	28
2.5. Аналіз залежностей для розрахунку конвективного теплообміну в газотрубному пучку	29
2.6. Методи запобігання конденсації смол в водогрійних котлах малої потужності на нетрадиційних паливах	40
2.7. Математичний опис моделі теплових та аеродинамічних процесів в котлі малої потужності	46
2.8. Програмне забезпечення для теплового розрахунку водогрійних котлів малої потужності.....	60
РОЗДІЛ 3. ІНТЕНСИФІКАЦІЯ ТЕПЛООБМІНУ В ГАЗОТРУБНОМУ КАНАЛІ ВОДОГРІЙНОГО КОТЛА.....	62
3.1. Сучасний стан досліджень інтенсифікації теплообміну в елементах котла.....	62
3.2. Огляд існуючих дослідних установок	67
3.3. Експериментальний стенд для дослідження теплообміну в круглому каналі газоводяного теплообмінника	71
3.3.1. Планування експерименту.....	72
3.3.2. Методика проведення дослідів	73
3.3.3. Методика обробки дослідних даних	73
3.3.4. Оцінка очікуваних похибок.....	74

3.4. Експериментальний стенд для дослідження інтенсифікації теплообміну в газотрубному елементі водогрійного котла	75
3.4.1. Діапазони зміни основних параметрів	77
3.4.2. Методика проведення дослідів	77
3.4.3. Методика обробки дослідних даних	77
3.4.4. Оцінка очікуваних похибок.....	78
3.5. Дослідження теплообміну в гладкотрубному каналі.....	78
3.6. Ефективні методи інтенсифікації теплообміну в круглому каналі.....	80
3.7. Показники роботи водогрійного котла на природному газі потужністю 32 кВт.....	90
3.8. Показники роботи газогенераторного котла на деревині потужністю 40 кВт.....	97
3.9. Розробка універсальних котлів на твердих відходах та газоподібному паливі для теплозабезпечення енергоефективної системи утилізації органічних відходів.....	99
РОЗДІЛ 4. ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ВОДОГРІЙНИХ КОТЛІВ МАЛОЇ ПОТУЖНОСТІ.....	104
4.1. Сучасні методи оцінки енергетичної та екологічної ефективності водогрійних котлів малої потужності	104
4.1.1. Методи оцінки енергетичної ефективності котлів	104
4.1.2. Методи оцінки екологічної ефективності котлів	107
4.2. Розробка системи оцінки екологічної ефективності ВКМП з використанням методології життєвого циклу (LCA).....	112
4.2.1. Систематизація інформації про шкідливі викиди з врахуванням життєвого циклу котлів.....	112
4.2.2. Оцінка ефективності водогрійного котла з використанням методології LCA.....	113
4.3. Критерії оцінки ефективності інтенсифікації теплообміну	114
4.3.1. Критерії ефективності інтенсифікації теплообміну в газотрубному пучку котла малої потужності з врахуванням життєвого циклу	121
ВИСНОВКИ.....	129
ЛІТЕРАТУРА	132

ПЕРЕДМОВА

На даний час для України енергозбереження та використання альтернативних палив виходить на перший план, оскільки це не тільки збереження коштів і зменшення залежності від закордонних імпортерів енергоресурсів, але й зменшення шкідливих викидів в навколишнє середовище.

Останнім часом в Україні швидко зростає виробництво водогрійних котлів потужністю до 100 кВт. В умовах погіршення екологічної та енергетичної ситуації при виготовленні теплогенерувального обладнання необхідно забезпечити зменшені шкідливі викиди, високий коефіцієнт корисної дії, невеликі малогабаритні показники.

Виробники переважно спираються на технічні рішення, використані у закордонних аналогах. Таким чином, швидкий темп виробництва не підкріплений науково-обґрунтованими розробками, немає надійних методів розрахунку інтенсифікованих тепломасообмінних процесів в елементах котлів та методів оцінки ефективності такого обладнання не тільки на етапі експлуатації, але і протягом всього життєвого циклу виробу.

Виходячи з світових тенденцій розвитку котельної техніки малої потужності, найближчим часом можна очікувати суттєвого зростання частки котлів на традиційних твердих паливах та органічних відходах. Але сьогодні особливостям розробки таких теплогенераторів приділено недостатньо уваги.

В першому розділі монографії розглядається сучасний стан розробки водогрійних котлів малої потужності на твердому паливі та природному газі. До того ж тут надано рекомендації з проектування водогрійних котлів малої потужності.

В другій частині монографії розглядається математичне моделювання теплових та аеродинамічних процесів в елементах водогрійних котлів малої потужності та сучасні методики теплового і аеродинамічного розрахунку опалювального обладнання малої потужності. Презентовано комп'ютерну програму, розроблену авторами.

В третьому розділі описані експериментальні дослідження проведені авторами, зроблені відповідні висновки.

В останньому розділі виконано систематизацію інформації про шкідливі викиди з врахуванням життєвого циклу котлів. Розроблено критерії оцінки ефективності котлів малої потужності з інтенсифікованим теплообміном на повному життєвому циклі обладнання.

В монографії описані розроблені методи визначення та підвищення ефективності водогрійних котлів малої потужності на традиційних та альтернативних паливах.

Автори вдячні рецензентам за надану підтримку, поради та зауваження.

Автори сподіваються, що монографія завдяки особливостям її побудови та викладу матеріалу буде корисна широкому колу читачів.

РОЗДІЛ 1. ВОДОГРІЙНІ КОТЛИ МАЛОЇ ПОТУЖНОСТІ

1.1. Сучасний стан розробки водогрійних котлів малої потужності

Виробництво побутової опалювальної техніки потужністю до 100 кВт на сьогодні досить сильно розвинуто в багатьох країнах світу, в тому числі і в Україні. Побутові котли – це теплогенерувальні агрегати з тепловою потужністю не більше 100 кВт, температура теплоносія, яких не перевищує 95 °С. Вони використовуються для підтримання необхідної температури теплоносія в автономних центральних та індивідуальних системах опалення [1].

За типом енергоносія сучасні водогрійні котли малої потужності (ВКМП) до 100 кВт поділяються на газові, твердопаливні, рідкопаливні, багатопаливні а також електричні [2–5]. Аналіз ринку опалювального обладнання показав, що найбільшого розповсюдження в нашій державі набули газові і твердопаливні ВКМП.

Українські виробники пропонують на ринку опалювальної техніки газові ВКМП, які за конструктивними і функціональними ознаками можна поділити на такі види [1–9]:

- за методом встановлення – підлогові, які стаціонарно встановлюються на підлозі, та настінні, які навішуються на стіні за допомогою анкерних болтів;
- за матеріалом з якого виготовлений теплообмінник – зі сталевим, чавунним і мідним теплообмінником;
- за типом пальників – з атмосферними і вентиляторними пальниками;
- за принципом відведення продуктів згорання – димохідні з відкритою камерою згорання та відведенням димових газів через вертикальний димохід, парпетні і турбокотли із закритою камерою згорання та відведенням продуктів згорання надвір через зовнішню стіну з допомогою спеціального горизонтального коаксіального каналу, причому в турбокотлах викид димових газів та всмоктування свіжого повітря для горіння знадвору відбувається примусово з допомогою електровентилятора, а в парпетних – природним шляхом;
- водотрубні, газотрубні, водотрубно-газотрубні;

- за кількістю виконуваних функцій – однофункціональні (одноконтурні), призначені тільки для опалення, і двофункціональні (двоконтурні), які забезпечують підігрів води як для системи опалення, так і для системи гарячого водопостачання.

Основна частина вітчизняних ВКМП, які переважно відпрацювали вже свій ресурс, використовує інжекційні пальники, в яких не регулюється співвідношення газ–повітря при зміні тиску газу. Тому для стійкого і повного горіння палива підтримується коефіцієнт надлишку повітря 1,3 – 1,6. В результаті такі котли мають ККД до 90 % [8]. Сучасний стан ККД нових котлів малої потужності, що працюють на природному газі 92–94 % [9].

Б. А. Соколов [10] виділяє такі напрямки розвитку котельної техніки малої і середньої продуктивності: підвищення енергетичної ефективності шляхом зменшення теплових втрат і більш повного використання енергетичного потенціалу палива; зменшення габаритів котельного агрегату за рахунок інтенсифікації процесів спалювання палива і теплообміну в топці і поверхнях нагріву; зниження шкідливих викидів (CO , NO_x , SO); підвищення надійності роботи котельного агрегата.

В зв'язку з постійним ростом цін на паливо в світовій практиці стали актуальними енергоефективні технології. Експлуатація котлів з низьким ККД дає перевитрату газу 5–15 % [11]. Суттєву економію палива можна отримати за рахунок зменшення втрат теплоти з відхідними газами. Тому з'явилась тенденція до використання інтенсифікаторів теплообміну в газотрубних каналах водогрійних котлів, для зменшення температури відхідних газів [11–15].

Авторами [6, 16–19] виділено такі заходи з підвищення енергетичної та екологічної ефективності ВКМП:

- 1) використання двоступеневих та модульованих мікрофакельних та інфрачервоних пальників для економії палива, покращення процесів горіння і зменшення шкідливих викидів;

- 2) використання насосів для вимушеної циркуляції води, зменшення масогабаритних показників, виключення можливості закипання води;

- 3) підвищення рівня автоматизації пальника та котла в цілому для покращення експлуатаційних характеристик, зменшення витрат палива;

- 4) якісна організація воднохімічного режиму;

- 5) збільшення ступеня екранування топок для зменшення габаритів котла та шкідливих викидів при спалюванні палива;
- 6) використання сплавів та легованих сталей для збільшення терміну роботи котла, особливо на біогазі, і для зменшення витрат палива за рахунок використання теплоти конденсації пари з відхідних газів;
- 7) попередній підігрів повітря.

1.2. Котли, що працюють на альтернативних видах палива

Україна належить до енергодефіцитних держав та задовольняє свої потреби у паливно-енергетичних ресурсах за рахунок власного видобутку за різними оцінками на 47–50 % [20, 21]. Велика різноманітність водогрійних котлів на газовому паливі [6] часто залишає осторонь такий перспективний клас теплогенерувального обладнання як котли на твердому паливі. В нашій країні котли на твердому паливі частіше застосовуються в районах з низьким рівнем газифікації, для опалення будинків, дач, приміщень побутового призначення. Застосування такого обладнання доцільне як з економічної точки зору так і екологічної [20, 22–24].

За кордоном котли на різних видах твердого палива отримують все більше розповсюдження в якості альтернативи установкам на імпортованих енергоносіях – природному газі та рідкому паливі. На користь використання деревної біомаси свідчать технічні, економічні та екологічні чинники [24, 25]. Впровадження технологічного обладнання, що працює з використанням деревної біомаси, характеризується малими термінами окупності, а відсутність в ній сірки, хлору та інших шкідливих для атмосфери елементів дозволяє уникнути шкідливих викидів в атмосферу [20, 26–28].

На сьогоднішній день є різноманітні моделі ВКМП на твердому паливі [26, 29, 30]. Котли з переднім завантаженням [22] відрізняються тим, що камера згорання найчастіше становить одне ціле із камерою завантаження. Це дає змогу одночасно спалювати весь об'єм завантаженого палива. Продуктивність таких котлів – низька. Окремим недоліком можна виділити необхідність в щоденному розпалюванні, усуненні попелу через кожні кілька днів, очищення димовідвідних каналів, принаймні раз на тиждень. В котлах з верхнім завантаженням камера згорання і камера завантаження розділені. Паливо зсипається з бункера і поступово згорає на колосниковій решітці. Ці котли харак-

теризуються простішим керуванням, вищою продуктивністю, нижчим рівнем викидів забруднювальних речовин і меншим виходом попелу. Котли з автоматичною подачею палива характеризуються кращою енергетичною ефективністю. В них паливо засипається у бункер, встановлений поруч із котлом, із якого за допомогою подавального пристрою транспортується до вмонтованої у котел спеціальної камери згорання. Відповідна ємність бункера уможлиблює роботу котла без обслуговування до 4–5 днів.

Котли на твердому паливі поділяються на такі типи: класичні (працюють лише на твердому паливі), універсальні (працюють на твердому, газоподібному і рідкому паливі) і газогенераторні котли.

В класичних котлах спалюються різні типи вугілля, деревина, тирса, торф, торф'яні і дерев'яні брикети, а також пелети. Деревина спалюється у вигляді дров чи мілкіших частинок (стружка, ошурки). Пелети отримують в результаті подрібнення і пресування відходів деревообробної промисловості. Ці гранули мають діаметр 4–10 мм, довжину 20–50 мм і теплоту згорання біля 14,4 МДж/кг. ККД котла, що працює на пелетах сягає 90 %, в той час як при прямому спалюванні інших видів твердого палива 74–85 %.

Універсальні котли мають такі модифікації [30–34]: робота на твердому паливі з пальниками для газу і рідкого палива; робота на твердому паливі із змінними пальниками для роботи на газоподібному чи рідкому паливі та вбудованим електронагрівником; робота на твердому паливі зі вбудованим пальником для рідкого і газоподібного палива та вбудованим електронагрівником. Перевагою таких теплогенераторів є можливість безперебійного теплопостачання у разі відсутності одного або декількох видів палива. До недоліків можна віднести високу вартість такого обладнання.

Газогенераторні котли є відносно новими на сучасному ринку опалювального обладнання. Перевагою газогенераторних котлів є високий для такого типу обладнання ККД – до 85–90 % і простота регулювання потужності. Крім того такі котли є більш екологічно чистими ніж котли на рідкому паливі. Відмінністю таких котлів від звичайних моделей є те, що в них горить не сама деревина, а газ, що виділяється з палива при термічній обробці.

Газогенераторний котел, як правило, виконується з двокамерною топкою. В першу камеру подається паливо і тільки частина необхідно-

го для повного спалювання повітря. Тут відбувається часткове спалювання і газифікація палива. У другій камері за рахунок подачі вторинного повітря відбувається остаточне допалювання утвореного генераторного газу. При такому згоранні майже не утворюється попіл та сажа. Між камерами розташоване сопло, через яке газ із верхньої камери надходить до нижньої. Один з варіантів виконання газогенераторних котлів – сопло і камера допалювання виконані з жаростійкої кераміки, і складають одне ціле. Газогенераторні котли мають деякі недоліки: великі габарити; труднощі при спалюванні різнофракційного палива; залежність від електроенергії; більш висока ціна (в 2–4,5 рази більша ніж традиційного котла такої ж потужності). Серед котлів з газогенерацією деревини можна відмітити такі [32–34]: Dakon KP Pyro, Atmos (сталеві) і Dakon Damat Pyro, (чавунні) (Чехія); Viessman Vitolig150, Junkers (Німеччина); Eco-vimar Orlanski (Польща).

Слід зазначити, що ККД котлів на твердому паливі знаходиться на рівні 74–85 %, в зв'язку з високою температурою відхідних газів (150 – 220 °С). Це пов'язано з властивістю твердих палив під дією високих температур утворювати смоли. При газифікації деревини, торфу, бурого вугілля, а також деяких видів кам'яного вугілля виділяється значна кількість смолянистих речовин, які конденсуються при охолодженні газу. Смолянисті речовини важко виділити з газу, оскільки їх дрібні частинки являють собою заповнені газом бульбашки, що легко відносяться [35]. Якщо відсутні спеціальні пристрої для уловлювання смол, то при проходженні димових газів вздовж димоходу і їх охолодженні, смоли осідають.

Спостереження за роботою котлів на твердому паливі показало, що осідання смол призводить до засмічування димоходу, зменшення площі перерізу для проходу газів, а також до загорання димоходу.

Тому для підвищення ККД котлів на твердому паливі необхідно розробляти технології ефективного спалювання палива, отримання безсмольного газу, ефективного уловлювання смол.

Одним із способів ефективного спалювання твердого палива є підігрів повітря (100...300 °С) [36], який призводить до суттєвого зменшення викидів CO та NO_x.

Слід зазначити, що в науковій літературі повідомлень про ВКМП на твердому паливі вкрай обмаль. Основна інформація зосереджена на Internet сайтах виробників та в рекламних проспектах. Крім того в лі-

тературі немає відомостей щодо методик теплового та аеродинамічного розрахунку ВКМП на твердому паливі.

Для виробництва котлів на твердому паливі українські виробники в основному використовують сталь або чавун. За кордоном, крім згаданих матеріалів набули поширення котли з елементами термостійких матеріалів (кераміки, майоліки), що дозволяє збільшити термін роботи теплогенератора.

В цілому габаритні розміри та маса вітчизняних котлів знаходяться на рівні показників закордонних апаратів при нижчій ціні. Слід також зазначити, що українські виробники майже не випускають газогенераторних котлів, хоча саме такі котли забезпечують високий ККД і екологічну чистоту спалювання палива, і з огляду на темпи забруднення навколишнього середовища є досить актуальними і перспективними.

Закордонні виробники застосовують високоякісну автоматику, що дозволяє регулювати якість спалювання, температуру теплоносія, та багато інших параметрів, а це в свою чергу призводить до значно вищої ціни на закордонне обладнання, ніж на українське. Крім того, закордонні виробники застосовують в котлах контури захисту від перегріву води, що здорожчує котел на 4–6 %.

1.2.1. Систематизація інформації по котлах на твердому паливі

При проектуванні нових конструкцій котлів потрібна не лише інформація про методи розрахунків, а й про масогабаритні показники котлів. Авторами [6] систематизовано таку інформацію для котлів на газовому паливі.

Кожна нова конструкція ВКМП не повинна виходити за типові маси, габарити і ціни існуючих котлів при однаковій тепловій потужності. В зв'язку з цим, нами систематизовано інформацію про існуючі вітчизняні і закордонні конструкції ВКМП на твердому паливі.

Нами систематизовано існуючу інформацію про котли та опалювальні печі на твердому паливі потужністю до 100 кВт і виконано сумісний аналіз їх показників [37]. Систематизацію інформації виконано на основі рекламних проспектів виробників, а також на основі інформації розміщеної на їхніх Internet-сайтах.

Котли на твердому паливі класифіковані за такими ознаками:

- за функціональним призначенням (для опалення, для гарячого водопостачання);
- за матеріалом, з якого виготовлений котел (чавун, сталь, кераміка);

- за залежністю від електроенергії (енергозалежні, енергонезалежні);
- за способом видалення відхідних газів (штучна, природна тяга);
- за способом спалювання (пряме спалювання, з газогенерацією);
- за способом завантаження (котли з переднім або верхнім завантаженням, з ручною, механізованою і автоматичною подачею палива).

Факторами, які взяті до уваги під час систематизації інформації, обрані такі: потужність котла, кВт; ККД котла, %; наявність функції гарячого водопостачання; матеріал котла; питома вага котла, кг/кВт; питомі габарити котла, м³/кВт; питомий об'єм котлової води, л/кВт; наявність функції газогенерації; залежність від електроенергії; система відведення димових газів; об'єм камери завантаження, л/кВт.

Були розглянуті такі котли та печі вітчизняного виробництва на твердому паливі потужністю до 100 кВт: «Данко» (м. Рівне); «Бул-лер'ян» (тов. ВИТ» м. Київ)); «Термо» (ЗАТ «Термо»); «Ретра 2М» (м. Рівне); «АН@ТОЛ» (м. Вінниця).

Із закордонні теплогенераторів представлені такі: «Atmos», «Viadrus», «Опор», «Dakon Dor», «Logica» «Protherm» (Чехія), «Buderus», «Vissman», «Junkers» (Німеччина), «Demrad Solitec» (Туреччина), «Kalvis» (Латвія), «Sime», «Ferrol» (Італія), «КЧМ Комби», «Зем-бец», «ОЧАГ» (Росія). Результати систематизації представлені на рис.1.1, 1.2.

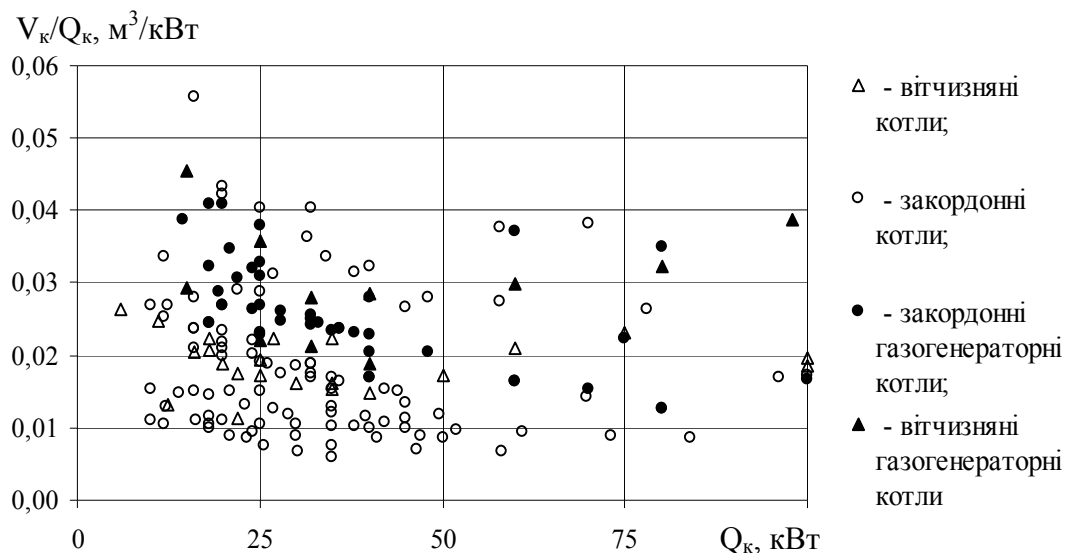


Рис. 1.1. Залежність питомих габаритів котлів V_k/Q_k від їх потужності Q_k

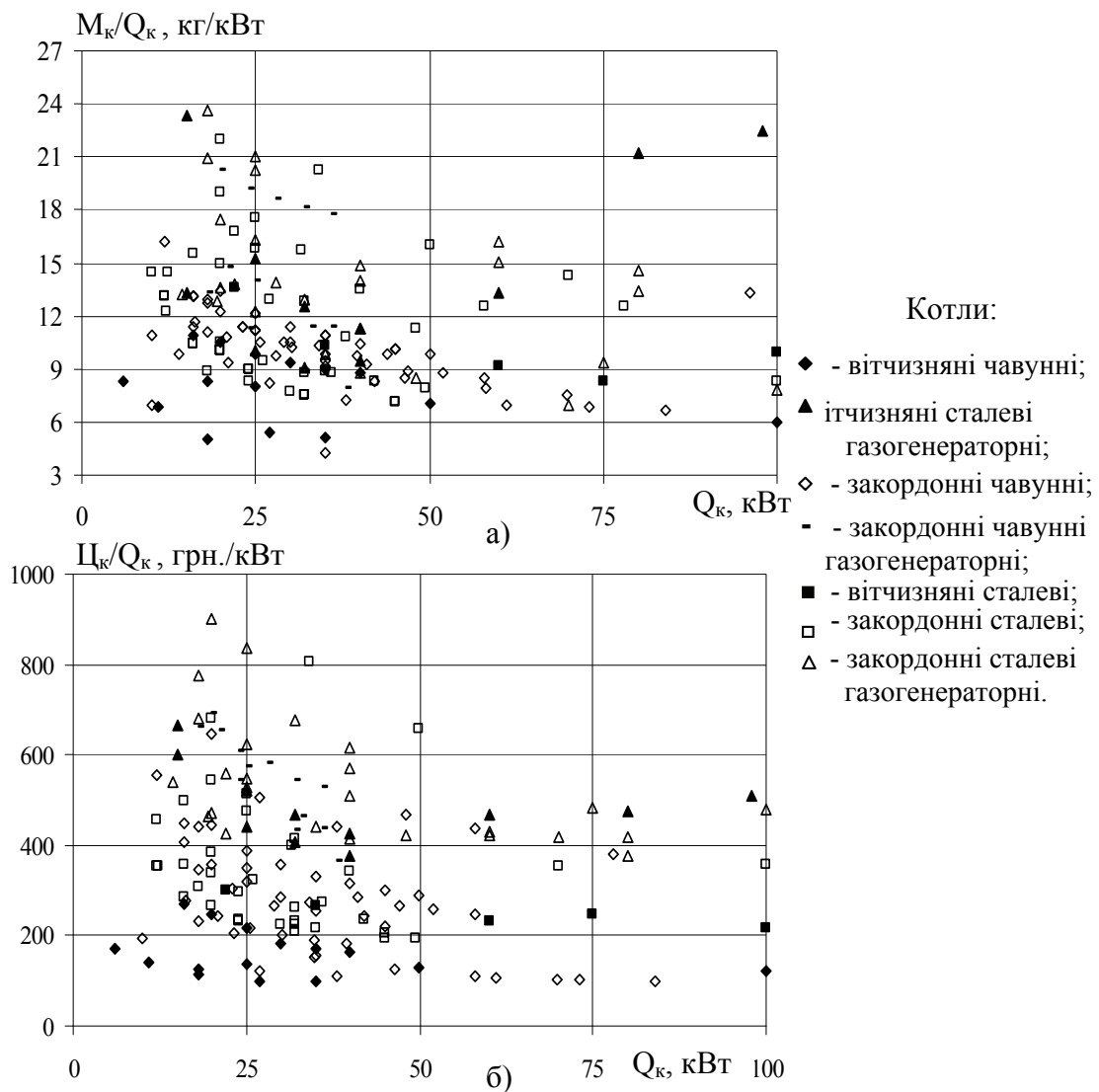


Рис. 1.2. Залежність питомої маси котла M_k/Q_k (а) та питомої вартості котлів Π_k/Q_k (б) від їх потужності Q_k , матеріалу та типу котла

Аналіз результатів систематизації показує, що ринок опалювального обладнання на твердому паливі зосереджений в діапазоні потужності 5–60 кВт.

В такому ж діапазоні знаходиться ринок опалювального обладнання на природному газі [6]. Як українські так і закордонні виробники мало випускають котлів потужністю 60–100 кВт. А саме таке обладнання необхідне для централізованого теплопостачання громадських та інших будівель, особливо в сільській місцевості та районних центрах.

1.3. Конструктивні ознаки водогрійних котлів на газовому паливі

З використанням доступної нам інформації проведено систематизацію конструктивних особливостей водогрійних котлів малої потужності на газовому та на твердому паливі (табл. 1.1).

Таблиця 1.1

Конструктивні ознаки ВКМП на газовому та твердому паливі

Ознака	Котел на газовому паливі	Котел на твердому паливі
1. Тип спалювання/котел	1.1 пряме спалювання 1.2 універсальний	1.1 пряме спалювання 1.2 газогенераторні 1.3 універсальні
2. Температура теплоносія	2.1 високотемпературний 2.2 низькотемпературний 2.3 конденсаційний	2.1 високотемпературний
3. Конструкція конвективного пучка	3.1 газотрубний 3.2 водотрубний 3.3 газоводотрубний	
4. Геометрична форма теплообмінника	4.1 трубчастий 4.2 пластинчастий	4.1 трубчастий
5. Кількість контурів	5.1 одноконтурний 5.2 двоконтурний	
6. Спосіб приготування гарячої води	6.1 одноконтурний з зовнішнім бойлером 6.2 двоконтурний з вбудованим в котловий об'єм змішувачем 6.3 двоконтурний з проточним водонагрівачем	
7. Матеріал топки	7.1 чавун 7.2 сталь 7.3 біметал (чавун/сталь)	7.1 чавун 7.2 сталь 7.3 кераміка 7.4 вогнетривка цегла 7.5 майоліка 7.6 комбіновані топки сталь + кераміка, сталь + майоліка
8. Матеріал теплообмінника	8.1 чавун 8.2 сталь 8.3 мідь 8.4 жароміцна сталь	
9. Форма топки	9.1 циліндрична 9.1.1 реверсна 9.1.2 нереверсна 9.2 прямокутного перерізу	9.1 циліндрична 9.2 прямокутного перерізу
10. Кількість ходів димових газів	10.1 одноходовий 10.2 двоходовий 10.3 триходовий 10.4 чотириходовий	

Продовження табл. 1.1

Ознака	Котел на газовому паливі	Котел на твердому паливі
11. Кількість камер топ-ки	11.1 однокамерна	11.1 однокамерна 11.2 двокамерна 11.3 трикамерна
12. Тип камери згорання	12.1 закрита 12.2 відкрита	
13. Тип пальника, коло-сничкової решітки або сопла газифікатора	13.1 атмосферний (інже-кційний) 13.1.1 атмосферний одноступеневий 13.1.2 атмосферний двоступеневий 13.1.3 атмосферний з плавною модуляцією 13.2 мікродифузійний 13.3 мікрофакельний 13.4 інфрачервоний 13.5 вентиляторний (з наддувом) 13.5.1 вентиляторний одноступеневий 13.5.2 вентиляторний двоступеневий 13.5.3 вентиляторний з плавною модуляцією 13.6 комбінований (газ-рідке паливо)	13.1 рухома колосникова решітка 13.1.1 охолодження водою 13.1.2. охолоджен-ня повітрям 13.2 нерухома колосни-кова решітка 13.2.1 охолодження водою 13.2.2 охолодження повітрям 13.3 сопло прямокутного поперечного перерізу 13.4 сопло круглого по-перечного перерізу
14. Подача палива	14.1 автоматизована	14.1 автоматизована 14.2 ручна
15. Залежність від елект-роенергії	15.1 енергозалежні 15.2 енергонезалежні з самозапуском 15.3 енергонезалежні без самозапуску	15.1 енергозалежні 15.2 енергонезалежні
16. Тип розпалювання	16.1 п'єзорозпалювання 16.2 електророзпалюван-ня	16.1 ручне
17. Димова труба	17.1 вертикальна 17.2 горизонтальна	17.1 вертикальна
18. Принцип видалення димових газів	18.1 природна тяга 18.2 вимушена тяга 18.2.1 дуттєвий вентилятор 18.2.2 димосос	
19. Теплоносій	19.1 вода 19.2 вода з додаванням антифризу 19.3 повітря	

Продовження табл. 1.1

Ознака	Котел на газовому паливі	Котел на твердому паливі
20. Циркуляція теплоносія (води)	20.1 природна циркуляція 20.2 вимушена циркуляція	
21. Інтенсифікація теплообміну	21.1 пластина 21.2 стрічка 21.3 шнек 21.4 дротова вставка 21.5 зігнута пластина 21.6 циліндрична вставка 21.7 сферичні виямки, канавки, виступи 21.8 оребрення 21.9 профілювання каналу і вставки	
22. Матеріал теплоізоляції корпусу котла	22.1 скловолокно 22.2 мінеральна вата 22.3 пінополіуретан 22.4 поліуретан	
23. Розташування теплообмінника	23.1 вертикальне 23.2 горизонтальне	
24. Розташування котла	24.1 підлогове 24.2 настінне	24.1 підлогове
25. Контрольно-вимірвальні прилади	25.1 термометр (термостат) 25.2 манометр 25.3 датчик тяги (регулятор тяги) 25.4 погодний контролер	25.1 термометр (термостат) 25.2 манометр 25.3 датчик тяги (регулятор тяги) 25.4 погодний контролер 25.5 регулятор обертів дуттєвого вентилятора
26. Системи захисту	26.1 від перегріву 26.2 від порушення режиму водовідведення 26.3 від надходження газу без запалення 26.4 від відключення електроенергії 26.5 від замерзання 26.6 іонізаційний контроль горіння (датчик горіння)	26.1 петля захисту від перегріву 26.2 вприскування води в зону горіння 26.3 від замерзання
27. Розширювальний бак	25.1 вбудований в котел 25.2 винесений за межі котла	

1.4. Рекомендації з проектування водогрійних котлів малої потужності

Рекомендації з проектування водогрійних котлів малої потужності складаються з: рекомендацій з конструювання; рекомендацій з теплового і аеродинамічного розрахунку; рекомендацій з оцінки ефективності котла та його газотрубного елемента.

Ці рекомендації розроблені на основі аналізу літературних джерел, власних розробок. До уваги були прийняті Internet-сайти виробників котлів а також інформація розміщена ними на рекламних буклетах і аналітичні статті в Internet.

Важливою особливістю при конструюванні котлів для спалювання/газогенерації є неможливість точно розрахувати їх теплову потужність. Це пов'язано з тим, що теплота згорання різних сортів деревини та її відходів значно відрізняється, і залежить від вологості, яка змінюється в широких межах. Швидкість горіння залежить від розмірів і форми кусків палива. Тому при проектуванні котлів на деревині необхідно передбачати запас теплової потужності обладнання. Від рівня продуманості конструкції котла залежить ефективність його подальшої роботи, надійність і довговічність.

Конструктивні особливості котлів малої потужності визначаються перш за все видом палива. На сьогоднішній день є велика кількість різних моделей котлів на твердому паливі як вітчизняного, так і закордонного виробництва. Слід зазначити, що скільки є моделей котлів стільки ж є конструкторських рішень. Тому чітких рекомендацій з конструювання котлів малої потужності на твердому паливі нами не виявлено.

Нами проаналізовані фактори, які впливають на конструктивне виконання котла та режими роботи: принцип спалювання; вид палива; характеристики палива; принцип видалення димових газів; подача палива (ручна, механізована).

Принцип спалювання суттєво впливає на конструкцію котла. В основному це визначає конструкцію і принцип роботи топкової камери, вибір матеріалів і можливості управління технологічним процесом.

Характеристики використаних матеріалів, такі як товщина, ізоляційні і поверхневі характеристики, впливають на значення температури в топковій камері.

Котли з прямим спалюванням виконуються однокамерними, зі сталі чи чавуну, інколи з футеровкою топки. В більшості випадків з

природною тягою. Характеризуються поганою керованістю робочих процесів. ККД котлів при прямому спалюванні складає 74–85%. Для кращої роботи котла рекомендується застосовувати ступеневу подачу повітря і його попередній підігрів.

Ступенева подача повітря забезпечує одночасне зниження рівня викидів від неповного згорання і викидів NO_x за рахунок розділення етапів виходу летких компонентів і згорання газової фази. Це підвищує ефективність змішування паливного газу з вторинним повітрям і зменшує кількість необхідного повітря, знижуючи локальний і загальний коефіцієнти надлишку повітря і збільшуючи температуру горіння.

Товщина шару палива повинна бути такою, щоб при роботі котла на номінальній продуктивності при мінімальній витраті енергії на продування первинного повітря через шар палива прогари шару палива були виключені.

Необхідною умовою надійної роботи котла є правильно розраховані розміри топки. При спалюванні деревини виділяється велика кількість летких речовин, тому полум'я деревини має висоту до двох метрів. При низькій висоті топкової камери полум'я впирається в свод теплообмінника, що охолоджується теплоносієм, леткі речовини охолоджуються, осідають на своді. Відбувається недопалювання смол та інших летких речовин. Відповідно вони осідають в трубках теплообмінників і закоксовують його.

Для ефективної роботи газогенераторного котла необхідно забезпечити оптимальне **співвідношення первинного/вторинного повітря**. Характер розподілення первинного і вторинного повітря в топковій камері і зоні факела впливає на якість змішування повітря з паливом, і, відповідно, на час перебування палива в топці і значення температури горіння, необхідної для повного згорання.

Необхідною умовою ефективної роботи газогенераторного котла є правильний підбір потужності вентилятора/димоса, а також розмірів сопел для газогенерації.

Технології спалювання і газифікації палива і конструювання топкових пристроїв повинні передбачати можливість підтримування такого значення коефіцієнта надлишку повітря, при якому сума втрат теплоти з відхідними газами і втрати теплоти внаслідок хімічної неповноти спалювання була б мінімальною. Значення коефіцієнта для певної конструкції можна визначити експериментально.

Вологість палива, що подається в топку, може складати 12–55 %. Волога випаровується на етапі виходу летких речовин, і вміст вологи зменшується в залежності від ступеню вигорання палива. Тому негативний вплив рівня вологості на процес горіння може бути значним на перших етапах фази виходу летких речовин. Чим більша вологість твердого палива, тим більшою повинна бути висота гарячої зони, в якій відбувається процес газифікації палива.

Спалювання вологого палива неекономне, приводить до зниження температури згорання, до високого вмісту шкідливих викидів і відкладення смоли в димовій трубі. Тому рекомендується використовувати паливо з вологістю до 25–35 %.

Для підвищення температури в зоні горіння топкову камеру утеплюють жаростійкими сегментами і шамотними дошками, або викладають з кераміки чи майоліки. Це покращує процес спалювання особливо для вологого палива.

Для підвищення температури в топці варто застосовувати **попередній підігрів повітря**. Повітря може бути підігрітим за рахунок відхідних газів або за рахунок використання теплоти шару палива. Ця особливість закладається в конструкцію котла на етапі проектування. Для спалювання твердого палива з вологістю вищою 20 % температура дуттєвого повітря повинна бути не меншою 100 °С.

Покращення ізоляції котла можна досягти шляхом збільшення товщини ізоляційного шару чи використання матеріалу з кращими ізоляційними характеристиками. Це зменшує втрати теплоти з охолодженням котла, і, відповідно, приводить до збільшення ККД.

Фракційний склад палива повинен бути оптимальним для цього виду топкового пристрою. Відхилення в розмірі частинок як в сторону збільшення так і в сторону зменшення знижують ефективність роботи топки. При наявності кусків палива різного розміру велика фракція палива доходить до колосникової решітки із значним механічним недопалюванням, а мілка забиває канали шару, порушуючи його рівномірність по перерізу шахти газогенератора. В результаті місцеві перегріву шару закінчуються шлакуванням і зупинкою процесу. Наявність смол і властивість палива спікатись при нагріві, і пов'язані з цим механічні і гідравлічні проблеми дуття, шуровки і стабільності всього процесу в цілому обмежують розмір фракцій дроблення.

Розмір фракцій впливає на конструктивні особливості котла, зокрема на розміри отворів в колосниковій решітці, а також на розмір со-

пла, яке використовується в газогенераторних котлах. У випадку ручного завантаження раціонально спочатку завантажувати великі куски палива, а зверху – мілкіші. А механізовану подачу палива можна використовувати лише для невеликих фракцій палива.

Зольність і здатність до смолоутворення. При спалюванні біомаси підвищеної зольності повинні бути передбачені технічні вирішення конструктивних елементів топкового пристрою, що гарантують безперервне сходження шлаку із зони горіння і можливість його видалення з топки вручну чи спеціальними механізмами. З метою полегшення обслуговування котла в конструюванні необхідно передбачати великий простір для золи (зольник).

Під час розрахунку котла на твердому паливі вологість і зольність палива приймають максимальними для цих конкретних умов.

Методи запобігання конденсації смол в котлах малої потужності на нетрадиційних паливах наведені в наступних розділах.

Принцип видалення димових газів. Для видалення продуктів згорання використовуються такі способи: природна тяга; дуттєвий вентилятор; димосос.

Перевагою котлів з **природною тягою** – енергонезалежність, недолік – погана регульованість, що призводить до перевитрати палива.

Димосос (витяжний вентилятор), на відміну від нагнітального, відсмоктує продукти згорання і цим зводить до мінімуму димлення при експлуатації котла (доцільність з точки зору техніки безпеки).

Дуттєвий вентилятор дає можливість якісніше регулювати співвідношення первинного/вторинного повітря і покращувати теплотехнічні і екологічні показники котла. Такі вентилятори частіше використовуються сучасними виробниками.

При роботі котла з вимушеною тягою, є можливість ускладнювати газовий тракт різноманітними інтенсифікаторами теплообміну як в топці, так і в конвективній частині, каталізаторами тощо. Це дасть можливість покращити теплообмін і зменшити габарити котла.

Подача палива. Для механізованої подачі палива використовують шнекові механізми, а також поршні. подача шнеком сильно обмежена розмірами фракцій. Брикет, вугілля, відходи деревини–автоматично подати в топку можна лише поршнем. Такі котли зручні з точки зору експлуатації, їх не потрібно постійно обслуговувати. Але вони залежні від електроенергії.

ЛІТЕРАТУРА

1. Швець Я. С. Сучасні побутові газові котли вітчизняного виробництва: Класифікація, основні вимоги і тенденції розвитку / Я. С. Швець // Ринок інсталяцій. – 2004. – № 1. – С. 6–7.
2. Котли опалювальні водогрійні теплопродуктивністю до 100 кВт. Загальні технічні умови: ДСТУ 2326–93. – [Чинний від 1995-01-01]. – К. : Держстандарт України, 1994. – 17 с. – (Державний стандарт України).
3. Тиатор И. Отопительные системы / Тиатор И. – М. : Техносфера, 2006. – 272 с.
4. Швець Я. С. Побутові газові котли: підбір, встановлення, експлуатація/ Я. С. Швець. Вид. 2 - е перероб. і доп. – Львів : ЕКОінформ. – 2008. – 264 с.
5. Теплотехніка: газові та електричні водогрійні апарати // Ринок інсталяцій. – 2003. – № 10 . – С. 33.
6. Степанов Д. В. Технічні та екологічні показники водогрійних котлів потужністю до 100 кВт / Д. В. Степанов, С. Й. Ткаченко, І. Г. Чорна // Вісник Хмельницького національного університету. – 2006. – № 1. – С. 114–117.
7. Васильев А. В. Повышение надежности жаротрубных водогрейных котлов /А. В. Васильев, Г. В. Антропов, А. И. Баженов // Промышленная энергетика. – 1998. – № 7. – С. 19–22.
8. Васильев А. В. Сравнительный анализ эффективности паровых и водогрейных котлов для промышленных и отопительных котельных. / А. В. Васильев, Г. В. Антропов, А. А. Сизоненко // Промышленная энергетика. – 2003. – № 9. – С. 18–23.
9. Соколов Б. А. Котельные установки и их эксплуатация / Б. А. Соколов. – 2-е изд., испр. – М. : Академия, 2007. – 432 с.
10. Сігал И. Я. Аналіз стану котельного господарства України з метою модернізації, продовження ресурсу чи заміни котлів малої і середньої потужності / И. Я. Сігал, Е. П. Домбровська // Экотехнологии и ресурсосбережение. – 2003. – № 6. – С. 25–30.

11. Шахлина Н. А. Интенсификация теплообмена в газотрубных котлах с использованием профилированных поверхностей теплообмена : автореф. дис. на соискание ученой степени канд. техн. Наук : спец. 05.14.04 «Промышленная теплоэнергетика» / Н. А. Шахлина. – Екатеринбург, 2007. – 20 с.
12. Колядин Е. А. Исследование и научное обоснование интенсификации теплообмена в судовых газотрубных утилизирующих котлах : автореф. дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук: спец. 05.08.05 «Судовые энергетические установки и их элементы (главные и вспомогательные)»/ Е. А. Колядин. – Астрахань, 2007. – 20 с.
13. Betul Ayhan. Investigation of turbulators for fire tube boilers using exergy analysis [Электронный ресурс] / Betul Ayhan // Turkey Journal engineering environmental science. – 2001. – №5. – P. 249–258. – Режим доступа до журн.: <http://mistug.tubitak.gov.tr/bdyim/toc.php?dergi=muh&yilsayi=2001/4>
14. Петриков С. А. Прогрессивные способы интенсификации теплообмена в отопительных котлах / С. А. Петриков, Н. Н. Хованов // Промышленная энергетика. – 2003. – № 12. – С. 18–22.
15. Шахлина Н. М. Повышение эффективности работы газотрубных котлов за счет использования профилированных поверхностей теплообмена / Н. М. Шахлина, В. А. Мунц // Промышленная энергетика. – 2007. – № 9. – С. 28–30.
16. Новожилов Ю. Н. Схема подогрева воздуха в котлах малой мощности / Ю. Н. Новожилов // Промышленная энергетика. – 2003. – № 9. – С. 27.
17. Васильев А. В. Особенности водного режима при эксплуатации современных жаротрубных водогрейных котлов [Электронный ресурс] / А. В. Васильев // Новости теплоснабжения. – 2002 – № 4. – С. 50 – 52. – Режим доступа до журн.: <http://www.ntsni.ru/>
18. Жаднов О. В. Опыт оптимальной организации водно-химического режима отопительных котельных малой и средней мощности [Электронный ресурс] / О. В. Жаднов // Новости теплоснабжения. – 2007. – № 5. – С. 50–52. Режим доступа до журн.: <http://www.ntsni.ru/>

19. Васильев А. В. Повышение надежности жаротрубных водогрейных котлов / А. В. Васильев // Промышленная энергетика. – 1998. – № 7. – С. 19–22.
20. Хоренженко. Ю. В. Досвід роботи ТЕО будівництва автономної котельні на відходах деревини підприємства в м. Києві / Ю.В. Хоренженко, В. І. Дешко, М. М. Шовкалюк // Енергетика та електрифікація. – 2008. – № 5. – С. 53–59.
21. В. Г. Семенов. Біодизельне паливо для України. Вісник НАН України. – 2007. – № 4. – С. 18–22.
22. Футерко Л. Б. Використання деревної біомаси, як альтернативного джерела енергії [Електронний ресурс]/ Л. Б. Футерко // ЭСКО.– 2006 – № 5.– Режим доступу до журн.: <http://www.esco-ecosys.narod.ru>.
23. Головков С. И. Энергетическое использование древесных отходов / С. И. Головков, М. Ф. Коперин. – М. : Лесная промышленность, 1987. – 224 с.
24. Nussbaumer T. Combustion and co – combustion of biomass: fundamentals, technologies, and primary measures for emission reduction / T. Nussbaumer // Journal Energy & Fuels. – 2003. – Vol. 17.– P. 1510–1521.
25. Соловьев В. Н. Отработка элементов технологии газификации местных видов топлива и органических отходов в обращенном режиме / В. Н. Соловьев, Л. А. Бида, Г. И. Фокина и др. – Минск, 2003. – 37 с. – (Препринт/НАН Беларуси. Объед. ин-т энергетич. и ядер. исслед. – Сосны; ОИЭЯИ – 9.
26. Справочник потребителя биотоплива / Под. ред. Виллу Вареса. – Таллин : Таллинский технический университет, 2005. – 183 с.
27. Ахтимов Ф. Г. Опыт реконструкции котла Е 1/9 с переводом на сжигание древесных отходов / Ф. Г. Ахтимов // Промышленная энергетика. – 2008. – № 1. – С. 12–14.
28. Ахтемов Ф. Г. К вопросу об использовании древесных отходов (биомассы) в промышленной и коммунальной теплоэнергетике / Ф. Г. Ахтемов // Промышленная энергетика. – 2003. – № 10. – С. 5–7.

29. Каталог інноваційних пропозицій в галузі енергозбереження. – Львів : ЛьЦНТЕІ. – 2008. – 108 с.
30. Котли для твердого палива.// Ринок інсталяційний. – 2008. – № 4. – С. 28.
31. Голубкович А. В. Управление аэродинамическим и тепловым режимами топки при комбинированном сжигании жидкого и твердого топлива / А. В. Голубкович // Промышленная энергетика. – 2009. – № 4. – С. 41–48.
32. Dakon. Котлы на твердом топливе.[Электронный ресурс]/ Dakon – Режим доступа до сайту: <http://www.dakon.ru>.
33. Viessmann. – Режим доступа до сайту: <http://www.viessmann.com.ua>.
34. Atmos. – Режим доступа до сайту: <http://www.atmos.com.ua>
35. Д. Б. Гинзбург. Газификация твердого топлива / Д. Б. Гинзбург. – М. : Государственное издательство литературы по строительству, архитектуре и строительным материалам, 1958. – 200 с.
36. Коваленко Г. В. Исследование сжигания торфа и его смесей с древесиной в 2-х и 3-х камерных топках / Г. В. Коваленко, О. Е. Хлебников, А. А. Халатов // Промышленная теплотехника. – 2005. – № 3. – С. 50–55.
37. Степанов Д. В. Тенденції розвитку теплогенерувального обладнання на твердому паливі / Д. В. Степанов, С. Й. Ткаченко, Л. А. Боднар // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2008. – № 3. – С. 46–49.
37. Боднар Л. А. Ефективні методи інтенсифікації теплообміну в круглих каналах / Л. А. Боднар, Д. В. Степанов // Вісник Хмельницького національного університету. – 2009. – № 3 – С. 73–78.
38. Тепловой расчет котлоагрегатов (нормативный метод). – СПб : НПО ЦКТИ, 1998. – 256 с.
39. Аэродинамический расчет котельных установок (нормативный метод). / под. ред. С. И. Мочана. – 3-е изд. – Л. : Энергия, 1977. – 256 с.
40. Лук'янов О. В. Теоретичні основи і способи підвищення енергоекологічних характеристик теплогенераторів для локальних систем

теплопостачання : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня доктора техн. наук : спец. 05.23.03 «Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання» / О. В. Лук'янов. – Макіївка, 2007 – 34 с.

41. Губарь С. А. Методы и способы повышения тепловой и экологической эффективности жаротрубных теплогенераторов малой мощности для локального теплоснабжения : дис. канд. техн. Наук : 05.23.03 / Губарь Светлана Александровна. – Макеевка, 2004. – 214 с.

42. Ведрученко В. Р. Методика теплового расчета цилиндрических топочных устройств водогрейных котлов при сжигании жидкого и газового топлива / В. Р. Ведрученко, Н. В. Жданов // Промышленная энергетика. – 2008. – № 3. – С. 33–39.

43. Warga Z. Mean radiant temperature in fire-tube boilers / Z. Warga, P. Novak // Journal of the institute of Energy. – 2000. – Vol. 73. – P. 160–168.

44. Степанов Д. В. Математичне моделювання теплообмінних процесів у жаротрубному елементі водогрійного котла малої потужності /

Д. В. Степанов, С. Й. Ткаченко, Л. А. Боднар // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2007. – № 2. – С. 76–79.

45. Михеев М. А. Основы теплопередачи / М. А. Михеев, И. М. Михеева. – М. : «Энергия», 1977. – 343 с.

46. Кулинченко В. Р. Справочник по теплообменным расчётам / Кулинченко В. Р. – К. : Техника, 1990. – 152 с.

47. Исаченко В. П. Теплопередача : учебник для вузов / В. П. Исаченко, В. А. Осипова, А. С. Сукомел. – М. : Энергия, 1975. – 488 с.

48. Тепловой расчёт котельных агрегатов (нормативный метод) – Л : НПО ЦКТИ, 1973. – 260 с.

49. Степанов Д. В. Залежності для теплових розрахунків жаротрубних пучків котлів малої потужності / Д. В. Степанов, С. Й. Ткаченко, Л. А. Боднар, Т. Ю. Загаєцька // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2006. - № 2. – С. 31–40.

50. Беляев Н. М. Основы теплопередачи / Н. М. Беляев. – К. : Выща школа., 1989. – 343 с.

51. Neshumayev D. Experimental and numerical investigation of combined heat transfer augmentation technique in gas-heated channels. In:

Proceedings of the 4th International Conference on Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics, 18-23 Sept. 2005, Cairo, Egypt

52. Neshumayev D. Experimental investigation of various turbulator inserts in gas-heated channels / D. Neshumayev, A. Laid, T. Tiikma // *Experimental Thermal and Fluid Science*. – 2004. – Vol. 28(8). – P. – 877–886.

53. Neshumayev D. Radiation heat transfer of turbulator inserts in gas heated channels / D. Neshumayev, T. Tiikma // *Heat Transfer Research*. – 2008. – Vol. 39(5). – P. 403–412.

54. Yrjola J. Modelling and experimental studies on heat transfer in the convection section of a biomass boiler / J. Yrjola., J. Paavilainen // *Int. J. Energy Research*. – 2006. – Vol 30 (12) – P. 939–953.

55. Yrjola J. Modelling and experimental study on wood chips boiler system with fuel drying and with different heat exchangers. Doctoral Dissertation [Электронный ресурс] / J. Yrjola // Helsinki University of Technology. Department of Mechanical Engineering. Laboratory of Applied Thermodynamics. Режим доступа до дисертації <http://lib.tkk.fi/Diss/2006/isbn9512284391/isbn9512284391.pdf>.

56. Сукомел А. С. Теплообмен и трение при турбулентном течении газа в коротких каналах / А. С. Сукомел, В. И. Величко, Ю. Г. Абросимов. – М. : Энергия, 1979. – 216 с.

57. Стабников В. И. Процессы и аппараты пищевых производств / В. И. Стабников, В. Д. Попов. – М. : Пищепромиздат, 1959. – 584 с.

58. Справочник по теплообменникам в 2 томах / Пер. с англ. под ред. Б. С. Петухова, В. К. Шикова. – М. : Энергоатомиздат, 1987. – 560 с.

59. Кутателадзе С. С. Основы теории теплообмена / С. С. Кутателадзе. – М. – Л. : Машгиз, 1957. – 383 с.

60. Попов А. В. Управляемый процесс газификации биомассы / А. В. Попов, А. Ф. Рыжков // *Промышленная энергетика*. – 2008. – № 1. – С. 27–31.

61. Biomass gasification. Режим доступа <http://nariphalan.virtualave.net/gasbook.pdf>.

62. www.thersites.nl
63. Козлов В. Н. Технология пирогагенетической переработки древесины / В. Н. Козлов, А. А. Нимвицкий. – М.—Л., 1954. – 312 с.
64. Копко В. М. Теплоизоляция трубопроводов теплосетей: учеб.-метод. пособие/ В. М. Копко. – Минск : Технопринт, 2002. – 160 с.
65. Воликов А. Н. Сжигание газового и жидкого топлива в котлах малой мощности / А. Н. Воликов. – Л. : Недра, 1989. – 160 с.
66. Хзмалян Д. М. Теория горения и топочные устройства / Д. М. Хзмалян, Я. А. Каган. – М. : Энергия, 1976. – 560 с.
67. Померанцев В. В. Основы практической теории горения / В. В. Померанцев. – Л. : Энергия, Ленинградское отд.-ние, 1973. – 356 с.
68. Свідोцтво про реєстрацію авторського права на твір №32324 Комп'ютерна програма «Тепловий розрахунок водогрійних котлів малої потужності на традиційних та альтернативних паливах» (від 4.03.2010 р).
69. Петровский Ю. Ф. Современные эффективные теплообменники / Ю. Ф. Петровский, В. Г. Фастовский . – М. : Энергия, 1962. – 256 с.
70. Антуфьев В. М. Эффективность различных форм конвективных поверхностей нагрева / Антуфьев В. М. – М. : Энергия, 1966. – 184 с.
71. Гоголин А. А. Интенсификация теплообмена в испарителях холодильных машин / Гоголин А. А. – М. : Легкая и пищевая промышленность, 1982. – 220 с.
72. Мигай В. К. Расчет теплообмена в трубах со спиральными пластинчатыми интенсификаторами / В. К. Мигай // Инженерно-физический журнал. – 1979. – № 6. – С. 965.
73. Мигай В. К. Повышение эффективности современных теплообменников / В. К. Мигай. – Л.: Энергоатомиздат, 1980. – 144 с.
74. Мигай В. К. Моделирование теплообменного энергетического оборудования / В. К. Мигай. – Л. : Энергоатомиздат, 1987. – 264 с.
75. Щукин В. К. Теплообмен и гидродинамика внутренних потоков в полях массовых сил / В. К. Щукин. – М. : Машиностроение, 1980. – 240 с.

76. Коваленко Л. М. Теплообменники с интенсификацией теплоотдачи / Л. М. Коваленко, А. Ф. Глушков. – М. : Энергоатомиздат, 1986. – 238 с.
77. Дрейцер Г. А. Современные проблемы интенсификации теплообмена в каналах / Г. А. Дрейцер // Инженерно-физический журнал. – 2001. – т. 74, № 4. – С. 965.
78. Дрейцер Г. А. Проблемы создания высокоэффективных трубчатых теплообменных аппаратов / Г. А. Дрейцер // Теплоэнергетика. – 2006. – № 4. – С. 31–38.
79. Дрейцер Г. А. Методика оценки эффективности интенсификации теплообмена в теплообменных аппаратах / Г. А. Дрейцер // Изв. Вузов. Машиностроение. – 1999. – № 5–6. – С. 67–76.
80. Дрейцер Г. А. Исследование предельной интенсификации теплообмена в трубах за сет искусственной турбулизации потока / Г. А. Дрейцер, И. Е. Лобанов // Теплофизика высоких температур. – 2002. – № 6. – С. 958–963.
81. Калинин Э. К. Интенсификация теплообмена в каналах / Э. К. Калинин. – М. : Машиностроение, 1990. – 206 с.
82. Гухман А. А. Интенсификация конвективного теплообмена и проблема сравнительной оценки теплообменных поверхностей / А. А. Гухман // Теплоэнергетика. – 1977. – № 4. – С. 5–8.
83. Кузма-Кичта Ю. А. Методы интенсификации теплообмена / Ю. А. Кузма-Кичта. – М. : МЭИ, 2001. – 112 с.
84. Келбалиев Г. И. Интенсификация процессов теплообмена с переменной шероховатостью поверхности / Г. И. Келбалиев, Л. В. Лосенко // Инженерно-физический журнал. – 1990. – № 2. – С. 191 – 195.
85. Кейс В. М. Компактные теплообменники / В. М. Кейс, А. Л. Лондон. – М. : Энергия, 1967. – 256 с.
86. Письменный Е. Н. Теплообмін в шахматных пучках труб со спирально-ленточным разрезным оребрением /Е. Н. Письменный, В. А. Рогачев, В. Д. Булей // Промышленная теплотехника. – 2007. – № 6. – С. 15–22.

87. Письменный Е. Н. Новые теплообменные поверхности из труб с накатанным лепестковым оребрением / Е. Н. Письменный // Промышленная теплотехника. – 1996. – № 4. – С. 73–77.

88. Басок Б. И. Численное моделирование процессов аэродинамики в топке водогрейного котла со вторичным излучателем / Б. И. Басок., В. Г. Демченко, М. П. Мартыненко // Промышленная теплотехника. – 2006. – № 1. – С. 17–22.

89. Гришкова А. В. Уменьшение выбросов оксидов азота от водогрейных котлов путем внесения в топку промежуточного излучателя с оптимальными параметрами / А. В. Гришкова, Б. М. Красовский, А. Ю. Ракитин // Промышленная энергетика. – 2004. – № 5. – С. 32–33.

90. Демченко В. Г. Удосконалення топкових камер димогарних опалювальних котлів: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.14.06 «Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика»/ В. Г. Демченко. – 2006. – 20 с.

91. Исаев В. В. Применение промежуточных излучателей в топках котлов для снижения образования оксидов азота при сжигании газообразного топлива / В. В. Исаев // Промышленная энергетика. – 1994. – № 7. – С. 32–33.

92. Исаев В. В. Уменьшение образования оксидов азота при сжигании газа в котлах малой мощности / В. В. Исаев // Промышленная энергетика. – 1998. – № 8. – С. 47–49.

93. Куріс Ю. В. Підвищення теплотехнічних і екологічних показників спалювання біогазу в теплогенеруючому обладнанні: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.14.06 «Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика»/ Ю. В. Куріс. – 2007. – 19 с.

94. Куріс Ю. В. Ефективність спалювання сумішей природного газу та біогазу на побутовому котлі / Ю. В. Куріс, С. Й. Ткаченко // Новини енергетики. – 2006. – № 12. – С. 33–35.

95. Дрейцер Г. А. Влияние геометрической формы турбулизаторов на эффективность интенсификации конвективного теплообмена в трубах / Г. А. Дрейцер, А. С. Мякочин // Теплоэнергетика. – 2002. – № 6. – С. 57–59.

96. Щукин А. В. Интенсификация теплообмена сферическими выемками / А. В. Щукин // Изв. АН. Энергетика. – 1998. – № 3. – С. 47–64.
97. Рзаев А. И. Влияние геометрии интенсификатора спиральных канавок на конвективную теплопередачу в трубах / А. И. Рзаев // Теплоэнергетика. – 1992. – № 2. – С. 53–55.
98. Гортышов Ю. Ф. Эффективность промышленно перспективных интенсификаторов теплоотдачи / Ю. Ф. Гортышов, В. В. Олимпиев // Известия академии наук. Энергетика. – 2002. – № 3. – С. 102–119.
99. Гортышов Ю. Ф. Научные основы расчета высокоэффективных компактных теплообменных аппаратов с рациональными интенсификаторами теплоотдачи / Ю. Ф. Гортышов // Теплоэнергетика. – 2006. – № 4. – С. 2–14.
100. Олимпиев В. В. Расчет теплообмена и трения в канавках, поперечных к турбулентному потоку / В. В. Олимпиев, Н. Д. Якимов // Теплоэнергетика – 2002. – № 3. – С. 28–32.
101. Жукаускас А. А. Интенсификация теплообмена. Успехи теплопередачи / Жукаускас А. А. – Вильнюс Мокслас, 1988. – 188 с.
102. Халатов А. А. Теплообмен и гидродинамика в полях центробежных массовых сил : в 5 т. / А. А. Халатов, И. И. Борисов, С. В. Шевцов. – К. : Институт технической теплофизики НАН Украины. – 2005 – Т.5: Тепломассообмен и теплогидравлическая эффективность вихревых и закрученных потоков.: – Институт технической теплофизики НАН Украины. – 2005. – 500 с.
103. Ермолин В. К. Интенсификация конвективного теплообмена в трубе в условиях закрученного потока с постоянным по длине шагом / В. К. Ермолин // Инженерно-физический журнал. – 1960. – № 11. – С. 53–57.
104. Ибрагимов М. Х. Теплоотдача и гидравлическое сопротивление при винтовом движении жидкости в трубе / М. Х. Ибрагимов, Е. В. Монофилов // Теплоэнергетика. – 1961. – № 7. – С. 57–60.
105. Naphon P. Heat transfer and pressure drop in the horizontal double pipes with and without twisted tape insert [Электронный ресурс] / P. Naphon // International communications in heat and mass transfer. –

106. Рыжков А. Ф. Теплогидравлическая эффективность промышленных турбулизаторов в переходных режимах течения теплоносителя / А. Ф. Рыжков, Л. Жаргалхуу, М. Надир Саман // Промышленная энергетика. – 2006. – № 4. – С. 44–50.

107. Калякин С. Г. Экспериментальное исследование теплоотдачи в теплообменнике воздух–воздух / С. Г. Калякин, А. А. Цыганюк // Теплоэнергетика. – 2004. – № 8. – С. 23–26.

108. Кирсанов Ю. А. Оценка коэффициентов критериальных уравнений теплоотдачи отдельных трактов в теплообменнике / Ю. А. Кирсанов, Р. А. Назипов // Промышленная энергетика. – 2009. – № 5. – С. 39–43.

109. Н. Джонсон. Статистика и планирование эксперимента в технике и науке: методы планирования эксперимента / Н. Джонсон, Ф. Лион. – М.: Мир, 1981. – 520 с.

110. Спиридонов А. А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов / Спиридонов А. А. – М. : Машиностроение, 1981. – 184 с.

111. Адлер Ю. П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Адлер Ю. П., Маркова Е. В., Грановский Ю. В. – М. : Наука, 1971. – 283 с.

112. Лежнюк П. Д. Основи теорії планування експерименту. Лабораторний практикум / П. Д. Лежнюк, О. Є. Рубаненко. – Вінниця : ВНТУ, 2006. – 167 с.

113. Котли опалювальні водогрійні теплопродуктивністю до 100 кВт: Методи випробування і контролю теплотехнічних показників: ДСТУ 3948–2000. – [Чинний від 2001-01-01]. – К. : Держстандарт України, 2000. — 33 с.

114. Боднар Л. А. Експериментальні дослідження теплообміну в круглому каналі / Л. А. Боднар // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2009. – № 3. – С. 17–21.

115. Пат. 21404 України, МПК⁷ F28F1/10. Вставка для теплообмінної труби / Ткаченко С. Й., Степанов Д. В., Боднар Л. А.; заявник

та патентовласник Вінницький нац. техн. університет. – № 200610176; заявл. 25.09.06. ; опубл.15.03.2007, Бюл. № 3.

116. Пат. 19637 України, МПК⁷ F28F1/00. Вставка для теплообмінної труби / Ткаченко С. Й., Степанов Д. В., Боднар Л. А. заявник та патентовласник Вінницький нац. техн. університет. – № 200607988; - заявл. 17.07.06. ; опубл.15.12.06. ; Бюл. № 12.

117. Степанов Д. В. Експериментальні дослідження інтенсифікованого теплообміну в жаротрубному водогрійному котлі / Д. В. Степанов, С. Й. Ткаченко, Л. А. Боднар // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2008 – № 2. – С. 44–47.

118. Степанов Д. В. Експериментальні дослідження теплообміну в жаротрубному водогрійному котлі / Д. В. Степанов, С. Й. Ткаченко, Л. А. Боднар // Вісник Вінницького політехнічного університету. – 2008. – № 1. – С. 43–46.

119. Янко П. І. Впровадження контролю за спалюванням природного газу і мазуту в котлах малої продуктивності – шлях до заощадження палива / П. І. Янко // Енергетика та електрифікація. – 2008. – № 2. – С. 13–17.

120. Равич М. Б. Эффективность использования топлива. – М. : Наука, 1977. – 344 с.

121. Пат. 32334 України, МПК⁷ F22B33/00, C10J3/00. Енерготехнологічна установка з газогенератором / Ткаченко С. Й., Боднар Л. А., Пішеніна Н. В.; заявник та патентовласник Вінницький нац. техн. університет. – № 200800387 ; заявл. 11.01.2008. ; опубл.12.05.2008, Бюл. № 9.

122. Степанов Д. В. Разработка водогрейных котлов малой мощности на традиционных и альтернативных допливах / Степанов Д. В, Ткаченко С. Й., Боднар Л. А., Лысюк И. В., Горобец К. В. // Современная наука. Сборник научных статей. – 2010. – №1(3). – С. 13–16.

123. Демченко В. Г. Водогрейные котлы малой мощности. Возможности их модернизации и производства с учетом критериев эффективности [Електронний ресурс]/ В. Г. Демченко. Режим доступу до статті: <http://www.at-eat.com/st10.pdf>.

124. Жовмир Н. М. Экономия топлива при тепловой изоляции здания с переходом к применению конденсационных отопительных котлов / Н. М. Жовмир // Промышленная теплотехника. – 2009. – № 3. – С. 84–90.

125. Калафати Д. Д. Оптимизация теплообменников по эффективности теплообмена / Калафати Д. Д., В. В. Попалов. – М. : Энергоатомиздат, 1986. – 152 с.

126. Мигай В. К. Методика сравнения интенсифицированных поверхностей теплообмена / В. К. Мигай // Известия ВУЗов. Энергетика. – 1990. – № 9. – С. 101–103.

127. Конюхов Г. В. К определению эффективности поверхностей в условиях конвективного теплообмена / Г. В. Конюхов, Л. И. Петров // Известия АН СРСР. Энергетика и транспорт. – 1990. – № 3. – С. 168–171.

128. Коваленко Л. М. Оценка теплоэнергетической эффективности каналов теплообменных аппаратов / Л. М. Коваленко // Промышленная теплотехника. – 2005. – № 1. – С. 50–55.

129. Дубровский Е. В. Метод относительного сравнения теплогидравлической эффективности интенсификации процесса теплообмена в каналах теплообменных поверхностей / Е. В. Дубровский // Теплоэнергетика. – 2002. – № 5. – С. 47–53.

130. Дубровский Е. В. Метод относительного сравнения теплогидравлической эффективности интенсификации процесса теплообмена в каналах теплообменных поверхностей / Е. В. Дубровский // Теплоэнергетика. – 2002. – № 6. – С. 60–63.

131. Бажан П. Н. Справочник по теплообменным аппаратам / П. Н. Бажан, Г. Е. Каневец, В. М. Селивестров. – М.: Машиностроение, 1989. – 366 с.

132. Бессараб А. С. Оптимизация утилизационных теплообменных аппаратов / А. С. Бессараб, А. А. Долинский, Б. Х. Драганов // Промышленная теплотехника. – 2006. – Т. 26. – № 1. – С. 32–36.

133. Німецькі стандарти з шкідливих викидів http://www.blauer-engel.de/_downloads/vergabegrundlagen_en/e-uz-0.39.pdf.

134. Life cycle assessment: principles and practice. EPA600/R – 06/060. May 2006 [Електронний ресурс] / National Risk Management Research Laboratory. Cincinnati, Ohio, USA. Режим доступу: <http://www.epa.gov/NRMRL/Access/pdfs/600r06060.pdf>

135. Ayat E. Osman, Robert Ries. Optimization for cogeneration systems in buildings based on life cycle assessment. [Електронний ресурс] / Ayat E. Osman, Robert Ries // ITcon. – 2006. – Vol.11, P. 269 – 284. – Режим доступу до журналу: <http://itcon.org/2006/20/>

136. Організація стандартизації. Режим доступу: <http://www.iso.org>

137. Екологічне керування; Оцінювання життєвого циклу. Принципи та структура (ISO 14040:1997, IDT): ДСТУ ISO 14040:2004. – [Чинний від 2006-01-01]. – К. : Держспоживстандарт України, 2005. – 10 с. — (Національний стандарт України).

138. Екологічне керування; Оцінювання життєвого циклу. Визначення цілі і сфери застосування та аналізування інвентаризації (ISO 14041:1999, IDT): ДСТУ ISO 14041:2004. – [Чинний від 2006-01-01]. – К. : Держспоживстандарт України, 2006. – 20 с. – (Національний стандарт України).

139. Екологічне керування. Оцінювання життєвого циклу прикладу використання ISO 14041 для визначення мети і сфери застосування та аналізування інвентаризації (ISO/TR 14049:2000, IDT): ДСТУ ISO/TR 14049:2004. – [Чинний від 2006-01-01]. – К. : Держспоживстандарт України, 2006. – 38 с. — (Національний стандарт України).

140. Мезенцев А. П. Основы расчета мероприятий по экономии тепловой энергии и топлива / Мезенцев А. П. – Л. : Энергоатомиздат. Ленинградское отделение, 1984. – 120 с.

141. Куріс Ю. В. Розробка методики визначення емісії парникових газів при отриманні та використанні біоенергетичного палива / Ю. В. Куріс, Д. В. Степанов, С. Й. Ткаченко, Р. Г. Хейфец // Енергетика та електрифікація. – 2007. - № 4. – С. 57–63.

142. Куріс Ю. В. Емісія парникових газів в процесі спалювання біогазу / Ю. В. Куріс, Д. В. Степанов, С. Й. Ткаченко, Р. Г. Хейфец // Енергетика та електрифікація. – 2007. -№ 5. – С.33–38.

143. Ткаченко С. Й. Маловитратні режими біоконверсії / С. Й. Ткаченко, С. В. Коновалов, Е. П. Ларюшкін // Вісник Вінницького політехнічного університету. – 2000. – № 2. – С. 36–40.

144. Галузева методика розрахунку шкідливих викидів, які надходять від теплогенеруючих установок комунальної теплоенергетики України [Електронний ресурс] / Міністерство будівництва, архітектури та житлово-комунального господарства України. Наказ №67 від 16.03.2006. Режим доступу до закону: <http://uazakon.com/document/fpart24/idxx24031.htm>.

145. Железный В. П. Методика расчета эквивалентной эмиссии парниковых газов в промышленности / В. П. Железный, Н. П. Быковец, О. Я. Хлиева // Эко-технологии и ресурсосбережение. – 2004. – № 5. – С. 34–42.

146. Биковець Н. П. Методика розрахунку еквівалентної емісії парникових газів у промисловості (нові індикатори для еколого-енергетичного аудиту та менеджменту) : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.14.06 «Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика»/ Н. П. Биковець. – Одеса, 2006. – 20 с.

147. Eco-indicator 95. Manual for designers. Режим доступу: <http://www.pre.nl/download/EI95ManualForDesigners.pdf>.

148. The Eco-indicator 99. A damage oriented method for Life Cycle Impact Assessment. Methodology Report. 22 June 2001. Third edition. Mark Goedkoop, Renilde Spriensma. Режим доступу: http://www.pre.nl/download/EI99_methodology_v3.pdf.

149. Stefan Gobling – Reisemann. What is resource consumption and how can it be measured / Stefan Gobling – Reisemann // Journal of industrial ecology. – 2008. – Vol. 12, № 1. – P.10 – 23.

150. Jolliet O. IMPACT 2002+: A new Life Cycle Impact Assessment methodology. / International journal of LCA.–2003.–№ 8(6). – P. 324–330. / O. Jolliet, M. Margni, R. Charles. Режим доступу до журналу: <http://www.epfl.ch/impact>.

151. Програмне забезпечення SimaPro7. Режим доступу до програми: http://www.pre.nl/simapro/download_simapro.htm.

152. <http://www.eps.esa.chalmers.se/defaultmethod.htm>.

153. Куликов М. А. Риски воздействия атмосферных выбросов электростанций на здоровье населения / М. А. Куликов, Е. И. Гаврилов // Теплоэнергетика. – 2009. – № 1. – С.71–76.

154. Лук'янов О. В. Токсичні викиди газотрубних теплогенераторів автономних систем теплопостачання при спалюванні газоподібного палива / О. В. Лук'янов // Современное промышленное и гражданское строительство. – 2006. – № 1. – С. 30–36.

155. Высоцкий С. П. Проблемы эмиссии углекислого газа / С. П. Высоцкий // Экотехнологии и ресурсосбережение. – 2007. – № 3. – С. 47–50.

156. Impact assessment methods. Режим доступу: http://simapro.lifecycles.com.au/Impact_assessment_methods.htm.

157. Степанов Д. В. Методи оцінки екологічної ефективності водогрійних котлів малої потужності з врахуванням життєвого циклу / Д. В. Степанов, С. Й. Ткаченко, Л. А. Боднар // Вісник Хмельницького національного університету. – 2008. – № 6. – С. 80–84.

158. Боднар Л. А. Застосування методології оцінки впливу життєвого циклу виробу до котла малої потужності / Л. А. Боднар, Д. В. Степанов // Вісник Хмельницького національного університету. – 2009. – № 1. – С. 118–121.

159. Степанов Д. В. Критерії оцінки ефективності жаротрубного пучка з інтенсифікацією теплообміну для котла малої потужності [Електронний ресурс] / Д. В. Степанов, Л. А. Боднар // Наукові праці Вінницького національного технічного університету. – 2008. – № 4. Режим доступу до журн. : <http://www.nbu.gov.ua/e-journals/VNTU/2008-4/2008-4.files/uk/08dvswlc-uk.pdf>.

160. Степанов Д. В. Критерії оцінки ефективності інтенсифікації теплообміну в жаротрубному пучку котла малої потужності з врахуванням життєвого циклу / Д. В. Степанов, С. Й. Ткаченко, Л. А. Боднар // Энергетика та електрифікація. – 2010. – № 2. – С. 11–15.

Наукове видання

**Степанов Дмитро Вікторович
Боднар Лілія Анатоліївна**

**ЕНЕРГЕТИЧНА ТА ЕКОЛОГІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ
ВОДОГРІЙНИХ КОТЛІВ МАЛОЇ ПОТУЖНОСТІ**

Монографія

Редактор С. Малішевська

Оригінал-макет підготовлено Л. Боднар

Підписано до друку 16.11.2011 р.
Формат 29,7×42¼. Папір офсетний.
Гарнітура Times New Roman.
Друк різнографічний. Ум. др. арк. 8,55
Наклад 100 прим. Зам № 2011-173

Вінницький національний технічний університет,
КІВЦ ВНТУ,
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,
ВНТУ, ГНК, к. 114.
Тел. (0432) 59-85-32.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.

Віддруковано у Вінницькому національному технічному університеті,
в комп'ютерному інформаційно-видавничому центрі,
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,
ВНТУ, ГНК, к. 114.
Тел. (0432) 59-81-59
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.