

Назарова І.О.

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕКОЛОГІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ БІОПАЛИВНИХ КОТЕЛЕНЬ

Головною метою дослідження є підвищення коефіцієнта корисної дії (ККД) котельні, основним паливом для якої є біомаса, а саме дерев'яна тріска, а також покращення екологічних показників роботи цієї котельні. Підвищення енергоекологічної ефективності призводить до економії палива та скорочення терміну окупності котельні.

У роботі розглянуто основний метод підвищення ККД – встановлення контактного утилізатора теплоти відхідних газів від котла, головним завданням якого є охолодження продуктів згорання до температури, значення якої нижчі температури точки роси, і використання теплоти конденсації водяної пари для підвищення ефективності роботи системи. Встановлено, що ефективність системи буде збільшуватись у разі збільшення кількості додаткової теплоти від процесу конденсації, яка повертається в систему «котел–утилізатор». Отримані залежності теоретично-максимального підвищення ККД системи «котел–утилізатор» стосовно ККД котла від вологості тріски, а також залежність ККД системи «котел–утилізатор» від вологості палива за різних режимів роботи котла й утилізатора. Встановлена енергетична ефективність роботи контактного утилізатора в системі з котлом. Запропоновано використання контактного апарату, в якому процес контактного тепломасообміну відбувається у супутньому висхідному потоці газів і плівки рідини за швидкості газів, значення якої перевищує верхню межу «захливання» протиточного руху у вертикальних трубах. Приведені залежності для визначення коефіцієнта тепловіддачі в контактному утилізаторі з висхідним рухом теплоносія.

Визначені валові викиди забруднюючих речовин відхідних продуктів згорання та їх концентрації у разі спалювання дерев'яної тріски на виході з системи «котел–утилізатор» відомими розрахунковими методами. Отримано, що відповідно до чинних нормативів по викидах оксидів азоту, оксидів сірки та оксидів вуглецю граничнодопустимі концентрації не нормуються, а масові концентрації викидів твердих частинок не перевищують граничні значення.

Ключові слова: контактний утилізатор, контактний тепломасообмін, біопаливна котельня, система «котел–утилізатор», відхідні димові гази, біопаливо.

Постановка проблеми. Покращення умов довкілля та енергозбереження є найбільш актуальною проблемою на нинішньому етапі розвитку енергетики України. Актуальність наукових досліджень із заміщення викопного палива і впровадження ефективних технологій, працюючих на біопаливі, зростає у зв'язку з дорожчанням палива та посиленням вимог щодо зменшення забруднення навколишнього середовища тепловими установками. У відповідності до «Енергетичної стратегії України до 2035 року» [1] Україна має намір скоротити споживання викопного палива та збільшити частку відновлюваних джерел енергії до 25% у 2035 р. Використання біомаси в загальному обсязі відновлювальних джерел становить приблизно 83%, цей відсоток прогнозовано буде тільки зростати, що відображає тенденція останніх років. Таким чином, розробка комплексу захо-

дів з дослідження та впровадження енергозберігаючих теплотехнологій у секторі виробництва теплової енергії з біомаси є актуальним питанням сьогодення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз публікацій, присвячених дослідженню підвищення енергетичної ефективності котелень, показав, що основним методом підвищення ККД є встановлення утилізаторів теплоти відхідних газів від котла. Найпоширенішим напрямом теплоутилізації відхідних газів водогрійних опалювальних котлів, працюючих на природному газі, є підігрівання в теплоутилізаційному устаткуванні зворотної води системи теплопостачання перед надходженням її до котла [2–4]. З метою підвищення ефективності використання палива шляхом реалізації глибокого охолодження відхідних газів упродовж усього опалювального періоду

потрібно використовувати утилізовану теплоту для нагрівання теплоносіїв більш холодних, ніж зворотна вода теплової мережі, наприклад такими теплоносіями можуть слугувати холодна вода системи хімічного водоочищення та вода для технологічних потреб.

В Україні проблема глибокої утилізації теплоти відхідних газів досліджується вже понад 50 років. На основі цих досліджень розроблені і впроваджені утилізаційні установки та конденсаційні котли. Аналіз багатьох публікацій, наприклад [5–8], свідчить про те, що такі розробки переважно пов'язані з котельнями, що працюють на природному газі, а конструкції утилізаторів потребують вдосконалення. У разі все більш зростаючого дефіциту й удорожчання викопного енергетичного палива необхідно впроваджувати вискоелективні теплоутилізаційні технології для котелень, що працюють на біопаливі. Цей досвід мають європейські країни, наприклад Литва і Данія. Але під час проектування теплових схем котелень з глибокою утилізацією відхідних газів необхідно врахувати, що наприклад Литва та Україна мають різний температурний графік теплової мережі. У температурному графіку теплової мережі Литви у разі збільшення температури в прямому трубопроводі опалення температура зворотної води змінюється незначно (в межах 8 °С) [9]. Для України, навпаки, характерно значне (до 30°С) збільшення температури зворотної води у разі збільшення температури в прямому трубопроводі опалення, а значить, характерна і відсутність постійного джерела холодної води на вході в економайзер. Тобто необхідно знайти шляхи, які дадуть змогу широко використовувати утилізатори в закритій залежній схемі опалення системи теплопостачання України.

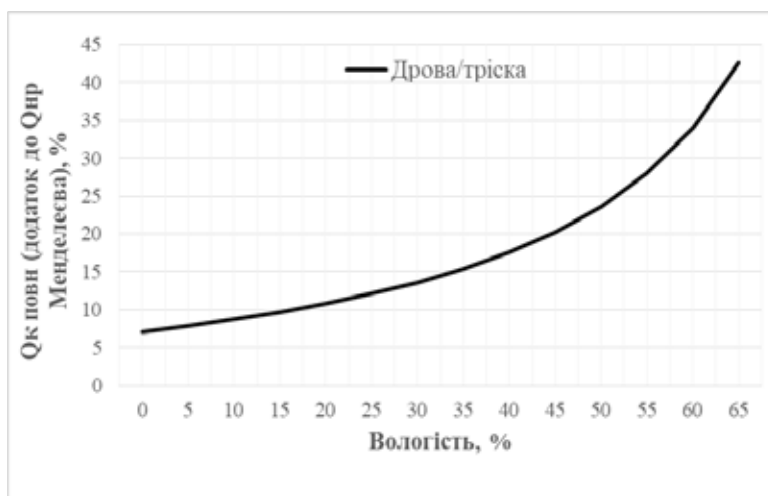


Рис. 1. Теоретично-максимальне підвищення ККД системи «котел-утилізатор» стосовно ККД котла

Постановка завдання. Метою цієї роботи є аналіз енергетичної і екологічної ефективності біопаливної котельні під час її роботи на дерев'яній трісці у системі з утилізатором теплоти відхідних газів.

Виклад основного матеріалу дослідження. На першому етапі досліджувалась енергетична ефективність біопаливної котельні від встановлення утилізатора та вплив вологості палива – тріски на ККД системи «котел-утилізатор». Основна задача контактного утилізатора – охолодити продукти згоряння до температури, значення якої буде нижчим за температуру точки роси, і використати теплоту конденсації водяної пари для підвищення ефективності роботи системи. Ефективність системи буде збільшуватись у разі збільшення кількості додаткової теплоти від процесу конденсації, яка повертається в систему «котел-утилізатор».

На підставі розрахунку повного згоряння тріски, розрахунку нижчої Q_n^p та вищої теплоти згоряння Q_v^p дерев'яної тріски було отримано, що теплота, що виділяється у разі повної конденсації водяної пари $Q_{конд}^{повн}$, становить додаткові 17,8% від Q_n^p :

$$\frac{Q_{конд}^{повн}}{Q_n^p} = 17,8 \%$$

Значення теплоти конденсації всієї водяної пари, що утворюється під час згорання одиниці палива, було розраховане для різної вологості дерев'яної тріски. Отримані таким чином дані дали змогу побудувати залежність теоретично-максимального підвищення ККД системи «котел-утилізатор» стосовно ККД котла (без теплових втрат в утилізаторі) від вологості тріски (рис. 1), а також залежність ККД системи «котел-утилізатор» від вологості палива за різних режимів роботи котла і утилізатора (рис. 2).

Визначення параметрів димових газів на виході з котлів – вході в утилізатор, розрахунок температури точки роси димових газів на вході в утилізатор, розрахунок теплового балансу системи «котел-утилізатор» та її елементів, розрахунок теплового балансу котлоагрегату дали змогу оцінити значення енергетичної ефективності від встановлення утилізатора. Підвищення ККД системи «котел-утилізатор» порівняно з ККД котла становить 13,6%.

Для утилізації теплової енергії відхідних газів котельні і отримання нагрітої води широко використовують контактні тепломасообмінні апарати, що дає змогу досягти глибокого охолодження газів і таким чином збільшити коефіцієнт використання теплоти палива. У таких апаратах передача теплоти від парогазових продуктів згоряння до рідини, що нагрівається, відбувається у разі безпосереднього контакту теплоносіїв, що значно покращує умови передачі теплоти і маси, а також дає змогу знизити викиди оксидів азоту (NO_x) під час їх абсорбції водою. Принцип дії контактних тепломасообмінних апаратів полягає в підігріві води гарячими продуктами згоряння шляхом їх безпосереднього зіткнення за відсутності розділових стінок поверхні нагрівання між теплоносіями. Поверхнею нагріву в контактних апаратах є поверхні плівки, крапель і струмків води, через яку відбувається тепло- і масообмін між газами і водою. Контактні апарати можуть бути форсунковими, каскадними (поличними), насадковими, барботажними, пінними [8]. У порожніх форсункових апаратах тепло- і масообмін відбувається в порожній контактній камері на поверхні численних крапель, що утворюються у разі подачі води під тиском через форсунки. Поверхня тепло- і масообміну може бути при цьому досить розвиненою, однак частина дрібних крапель, що являють найбільший інтерес з точки зору теплообміну, несеться з газами, і їх подальше уловлювання важке. Для диспергування рідини за допомогою форсунок потрібні значні витрати енергії. До недоліків належать також громіздкість і значний аеродинамічний опір, що пов'язаний з установкою ефективних краплевловлювачів. Апарат являє собою порожнистий циліндр, усередині якого поперек руху газу встановлені форсунки для розбрикування води. У каскадних (поличних, тарілчастих, дискових) апаратах теплообмін між димовими газами і водою відбувається у разі стікання води з полиці на полицю, багаторазового поперечного омивання струменів газами і барботування крізь плівку. Ці апарати прості за конструкцією, однак установка їх на значній висоті часто вимагає спеціальних будівельних споруд, а подача охо-

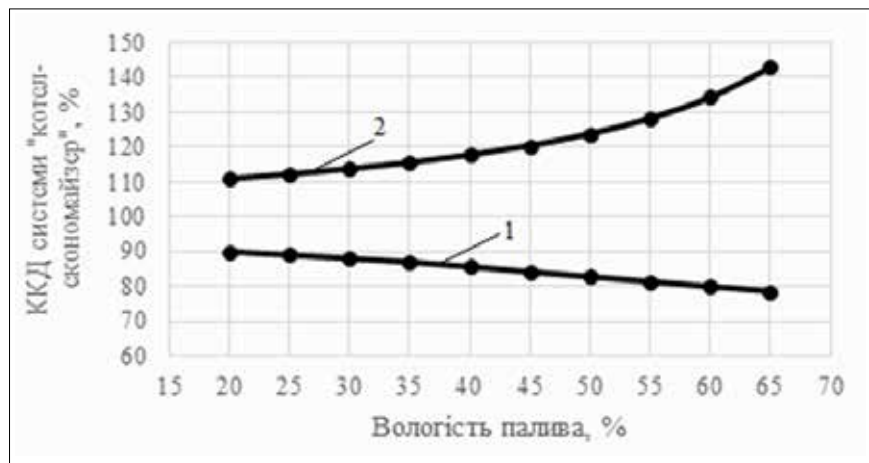


Рис. 2. Залежність ККД системи «котел-утилізатор» від вологості палива за різних режимів роботи котла й утилізатора. 1 – ККД системи без утилізатора; 2 – ККД системи з утилізатором

лоджувальної води на значну висоту пов'язана з великою витратою енергії. У барботажних апаратах поверхня контакту рідкої і газової фаз створюється у разі барботажу газу в рідину у вигляді бульбашок або цівок. Апарати мають форму високих колон, робочий простір яких розділений горизонтальними тарілками на ряд камер. Барботажні апарати характеризуються підвищеною інтенсивністю тепло- і масообміну на одиницю об'єму апарату, допускають роботу із забрудненими і помірно грузлими рідинами, нечутливі до коливань витрати теплоносіїв. До їх недоліків належать складність конструкції, металоємність, високий гідравлічний опір. Пінні апарати відрізняються високою інтенсивністю процесів тепло- і масообміну. Недоліком пінних апаратів є дуже високий аеродинамічний опір контактної камери, що викликає підвищену витрату електроенергії на власні потреби. Насадкові апарати є найбільш поширеним типом контактних тепломасообмінників. Насадки контактних апаратів можна розділити на дві групи: насипні і регулярні. Насипні насадки складаються з окремих, безладно засипаних або правильно покладених елементів. Регулярні насадки являють собою регулярні поверхні, укладені за певним законом у внутрішню порожнину апарату. Насипні насадки поряд з певними перевагами – технологічністю виготовлення, можливістю використання синтетичних матеріалів, відносно низькою ціною – мають істотні недоліки: низьку механічну міцність, велику металоємність, високий гідродинамічний опір, низьку величину питомої поверхні. Регулярні насадки характеризуються високою інтенсивністю тепломасообмінних процесів і невисоким гідродинамічним опором.

Таким чином, у більшості відомих конструкцій таких апаратів реалізується протиточна схема руху теплоносіїв. Недоліком такої схеми є низька швидкість руху газів в апараті (3 ÷ 4 м/с). Причина низької швидкості газів полягає у виникненні явища «захливання» течії. Відомо, що у разі збільшення швидкості руху теплоносіїв зростає інтенсивність процесів тепломасообміну. У контактному апараті [10] запропоновано підвищити швидкість газів до значення, яке перевищує верхню межу «захливання» протиточного руху у вертикальних трубах. Це забезпечує умови протікання контактного тепломасообміну в супутньому висхідному потоці газів і плівки рідини. У зв'язку з тим, що у висхідному потоці мають місце більш високі значення швидкості газового потоку, область стійкої плівкової течії рідини зміщується в бік значно більш високої щільності зрошення. Це, своєю чергою, призводить до значної інтенсифікації процесів міжфазної взаємодії та, як наслідок, до багаторазового збільшення середніх коефіцієнтів тепловіддачі [11] і масовіддачі [12] (рис. 3.) [11].

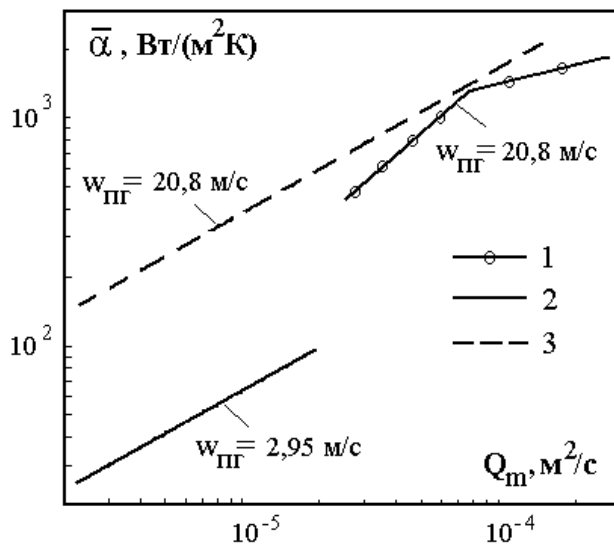


Рис. 3. Залежність середнього коефіцієнта тепловіддачі від щільності зрошення Q_m для різних випадків тепломасообміну. 1 – контактний тепломасообмін у разі супутньої висхідної течії парогазової суміші і рідини; 2 – контактний тепломасообмін у разі протиточного руху парогазової суміші і рідини на сітчастій насадці; 3 – умовна розрахункова залежність (екстраполяція залежності для протиточу)

Для визначення коефіцієнта тепловіддачі в контактному утилізаторі з висхідним рухом теплоносіїв необхідно скористатись такими залежностями [13]:

$$\bar{\alpha} = \frac{\overline{Nu} \cdot \lambda_r}{d_{\text{вн}}},$$

де число Нуссельта визначається як:

$$\overline{Nu} = 9,6 \cdot 10^4 \cdot Fr_{\text{пл}}^{1,1} \cdot (L/d)^{-0,75} \cdot \varphi^{0,43}$$

$$\text{при } Fr_{\text{пл}}^{\text{сп1}} < Fr_{\text{пл}} < Fr_{\text{пл}}^{\text{сп2}},$$

$$\overline{Nu} = 86 \cdot Fr_{\text{пл}}^{0,2} \cdot Re_r^{0,65} \cdot (L/d)^{-0,75} \cdot \varphi^{0,77}$$

$$\text{при } Fr_{\text{пл}}^{\text{сп2}} < Fr_{\text{пл}} < 6,4 \cdot 10^{-1},$$

$$Fr_{\text{пл}}^{\text{сп1}} = 2,68 \cdot 10^{-4} \cdot Re_r^{0,45} \cdot \varphi^{0,17} \cdot (L/d)^{0,5},$$

$$Fr_{\text{пл}}^{\text{сп2}} = 4,1 \cdot 10^{-4} \cdot Re_r^{0,72} \cdot \varphi^{0,38}.$$

Число Рейнольдса для парогазового потоку:

$$Re_r = \frac{w_r \cdot d_{\text{вн}} \cdot \rho_r}{\mu_r}.$$

Число Фруда для плівки рідини:

$$Fr_{\text{пл}} = \frac{Q_m}{\delta \sqrt{g \delta}}.$$

Для визначення висоти труб контактної апарату необхідно скористатись залежністю:

$$(L/d) = 26,77 \cdot Re_r^{-0,04} \cdot \varphi^{-0,17},$$

Об'ємна доля водяних парів у продуктах згорання:

$$\phi = \frac{V_{\text{H}_2\text{O}}}{V_r^d}.$$

Отже, високоефективний утилізатор підвищує енергоекологічну ефективність роботи котельні, позаяк, крім енергетичного ефекту, економайзер також працює як мокрий скруббер, забезпечуючи вловлювання забруднюючих речовин та твердих часток із димових газів, які потрапляють у конденсат.

На другому етапі досліджень проводився екологічний розрахунок системи «котел–утилізатор» та її елементів. У результаті процесу спалювання біомаси можуть утворитись такі забруднюючі речовини, як парникові гази та відходи, які разом із продуктами згорання потрапляють у навколишнє середовище або можуть потрапляти в ґрунти та воду.

Під час спалювання дерев'яної тріски потрібно розраховувати викиди оксидів азоту, сірки і вуглецю, твердих частинок. Визначення викидів забруднюючих речовин під час спалювання дерев'яної тріски було проведено розрахунковими методами згідно з відомою методикою. Відповідно до чинних нормативів по викидах оксидів азоту, оксидів сірки та оксидів вуглецю граничнодопустимі концентрації не нормуються. На підставі теоретичного розрахунку масові концентрації викидів твердих частинок не перевищують граничні значення.

Висновки. Технологію глибокої утилізації теплоти димових газів можна використовувати для підвищення енергетичної та екологічної ефективності біопаливних котелень.

У результаті досліджень отримано значення енергетичної ефективності від встановлення утилізатора за котлом, паливом для якого є дерев'яна тріска. Підвищення ККД системи «котел–утилізатор» порівняно з ККД котла становить приблизно 13,6%.

Під час проектування теплових схем біопаливних котелень слід враховувати значне (до 30°C) збільшення температури зворотної води у разі збільшення температури в прямому трубопроводі опалення. Це означає, що постійне джерело холодної води на вході в економайзер відсутнє, тобто необхідно знайти шляхи, які дадуть змогу широко використовувати утилізатори в закритій залежній схемі опалення системи тепlopостачання.

Список літератури:

1. Про схвалення Концепції реалізації державної політики у сфері тепlopостачання : Розпорядження Кабінету Міністрів України від 18.08.2017 № 569-р. *Офіційний вісник України*. 08.09.2017. № 70. С. 21–27.
2. Навродська Р.О. Підвищення ефективності теплоутилізаційних технологій для котельних установок комунальної теплоенергетики. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2015. Вип. 25.9. С. 225–229.
3. Маляренко В.А., Темнохунд (Казарова) І.О., Темнохунд О.О. Комунальна енергетика України: проблеми, шляхи розвитку. Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України. *Технічні науки. Вісник НТУСГ*. 2015. № 164. С. 138–140. ISBN 5-7987-0176X.
4. Фиалко Н.М., Шеренковский Ю.В., Степанова А.И., Навродская Р.А., Голубинский П.К., Новаковский М.А. Эффективность систем утилизации теплоты отходящих газов энергетических установок различного типа. *Промышленная теплотехника*. 2008. № 3. С. 68–76.
5. Кудинов А.А., Антонов В.А., Алексеев Ю.Н. Энергосбережение в газифицированных котельных установках путем глубокого охлаждения продуктов сгорания. *Теплоэнергетика*. 2000. № 1. С. 59–61.
6. Yefimov A.V., Goncharenko A.L. Thermal design technique for surface-type heat recovery condenser. *Motrol*. 2010, No. 12. Pp. 248–259.
7. Ефимов А.В, Гончаренко А.Л. Математическая модель системы «котел–теплоутилизатор». *Вестник Национального технического университета «ХПИ»*. 2010. № 21. С. 76–87.
8. Аронов И.З. Контактный нагрев воды продуктами сгорания природного газа. Ленинград : Недра, 1990. 280 с.
9. Adamczyk F. Integration of a Powerise Flue Gas Heat Recovery System in the Worldwide Largest Fluidized Bed Boiler Lagisza 460 MW Efficiency Increase and CO₂ Reduction. *VGB Power Tech*. 2008. No. 12.
10. Нагрівник текучої рідини: пат. 53256 А Україна. № 2002043046; заявл. 15.04.2002; опубл. 15.01.03, Бюл. № 1. 2 с.
11. Безродный М.К., Назарова И.А., Хавин С.А. Тепломассообмен при конденсации водяных паров из парогазовой смеси в восходящем потоке с пленкой жидкости. *Промышленная теплотехника*. 2003. № 4. С. 26–30.
12. Безродный М.К., Назарова И.А., Хавин С.А. Массообмен при конденсации водяных паров из парогазовой смеси в восходящем потоке с пленкой жидкости. *Енергетика: економіка, технології, екологія*. 2003. № 1. С. 58–70.
13. Безродный М.К., Хавин С.А., Назарова И.А. Тепломассообмен при спутном восходящем течении газа и жидкости. *Промышленная теплотехника*. 2003. № 1. С. 23–28.

Nazarova I.O. INCREASING ENERGY AND ECOLOGICAL EFFICIENCY OF BIOFUEL BOILERS

The main purpose of the study is to increase the efficiency of the boiler house, the main fuel for which is biomass, namely wood chips, as well as to improve the environmental performance of this boiler house. Increasing energy and environmental efficiency, respectively, leads to fuel savings and reduced payback period of the boiler house.

The main method of increasing the efficiency is considered – installation of a contact heat recovery from the boiler, the main task of which is to cool the combustion products to a temperature below the dew point temperature and use the heat of condensation to increase the efficiency of the system. It is established that the efficiency of the system will increase with increasing amount of additional heat from the condensation process, which returns to the system “boiler–utilizer”. The dependences of the theoretical-maximum increase of the efficiency of the “boiler–utilizer” system in relation to the efficiency of the boiler on cond humidity and the dependence of the efficiency of the “boiler–utilizer” system on fuel humidity at different

operating modes of the boiler and utilizer are obtained. The use of a contact apparatus in which the process of contact heat and mass transfer takes place in the concomitant upward flow of gases and a liquid film at a velocity of gases exceeding the upper limit of “flooding” of countercurrent motion in vertical pipes. The dependences for determining the heat transfer coefficient in the contact utilizer with the upward movement of the coolants are given.

The gross emissions of pollutants from the combustion products and their concentration during the combustion of wood chips at the outlet of the system “boiler-recycler” are determined by known calculation methods. It obtained that in accordance with the current standards for emissions of nitrogen oxides, sulfur oxides and carbon oxides, the maximum allowable concentrations are not normalized, and the mass concentrations of particulate matter emissions do not exceed the limit values.

Key words: *contact utilizer, contact heat and mass transfer; biofuel boiler house, “boiler–utilizer” system, flue gases, biofuel.*