

Иновативно преобразуване на отпадна ниско-потенциална топлина в електроенергия

Маг. инж. Диляна Колева, проф. д-р инж. Димитър Попов – Технически университет – София

Абстракт

Съществено подобряване на енергийната ефективност в множество индустриални процеси може да се постигне чрез пълноценното използване на отделяната от тях ниско-потенциална отпадна топлина. Нейното преобразуване в електроенергия е трудно осъществимо и в крайна сметка неизгодно при използване на традиционното в енергетиката работно тяло – вода респ. водна пара. В представеното изследване е използван алтернативен подход, при който вместо водна пара като работно тяло в енергопреобразувачия цикъл се използват органични флуиди. Те притежават множество благоприятни за целта топлофизични свойства включително и това, че претърпяват фазов преход при по-ниски температури от тези на водата. С методите на математичното моделиране е оценен ефекта от прилагането на Органичен цикъл на Ренкин при утилизирането на топлината на изходящите димни газове от котелен агрегат използван в целулозно-хартиената промишленост. Резултатите от изследването показват че произвежданата електроенергия е в количество обезпечаващо добрата рентабилност на проект за изграждане на съответната инсталация.

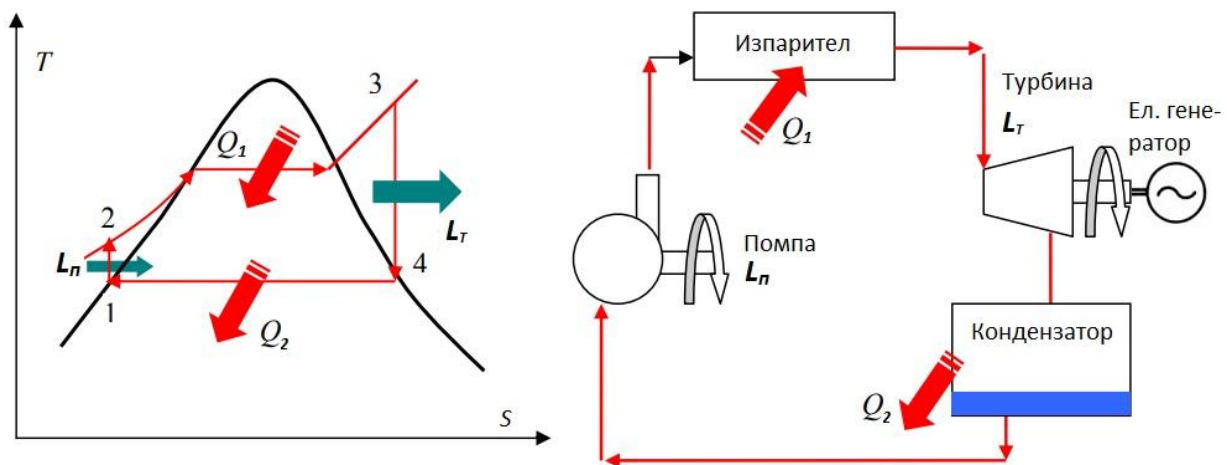
Въведение

Спестяването на енергия в бита и промишлеността е винаги актуална задача за страна бедна на енергийни ресурси, каквато е България. То води и до подобряване и на параметрите на околната среда, тъй като се съпътства с намаляване на емисиите на вредности, получавани при изгарянето на съответните горива. Работата на множество производствени съоръжения и системи е съпроводено с отделянето на голямо количество нископотенциална отпадна топлина, която много често не се оползотворява. Нейното преобразуване в електроенергия е трудно осъществимо при използване на традиционното в енергетиката работно тяло – водна пара. Съвременният подход при решаването на тази задача изисква прилагането на алтернативна технология, свързана с използването на органични флуиди като пентан, толуен, силоксани и др. в качеството им на работно тяло в енергопреобразувачия цикъл.

В настоящата статия се оценява възможността с отпадната топлина съдържаща се в димните газове изхвърляни в атмосферата от содорегенерационен котелен агрегат да се произвежда електрическа енергия. Енергопреобразуването се осъществява с така наречения Органичен цикъл на Ренкин. Изследването е извършено с математично моделиране, респ. с използването на специализиран приложен софтуер.

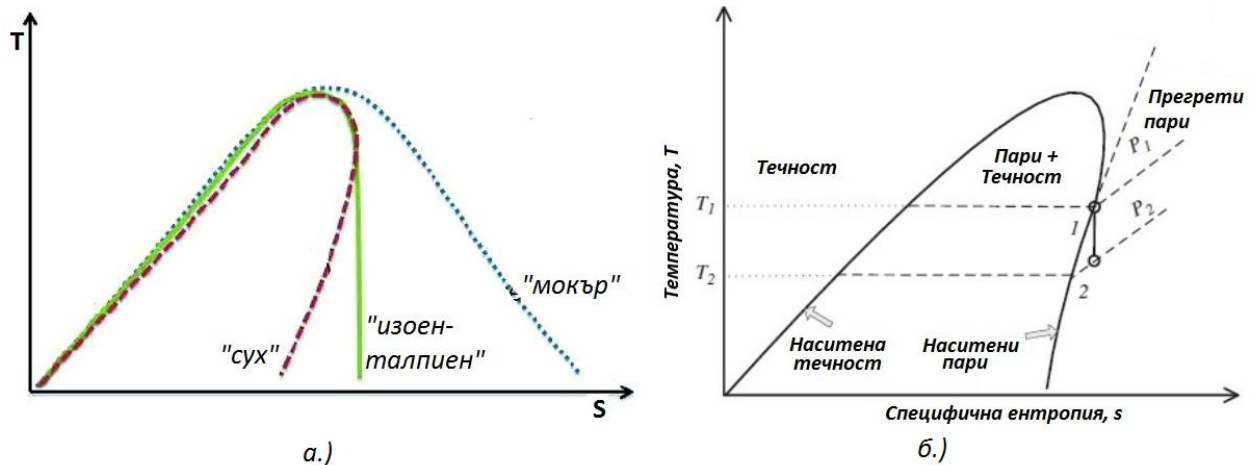
Органичен цикъл на Ренкин

Термодинамичният цикъл на Ренкин е изобретен в средата на 19 век от шотландския инженер, учен и изследовател Уилям Джон Маккорн Ренкин. Той разработва теорията на топлинните двигатели, в частност на парните бутални двигатели стоящи в основата на индустриалната революция започнала по това време в страните от Западна Европа и САЩ. По-късно парните бутални двигатели са заменени с парни турбини, но термодинамичният цикъл по същество остава същия. В днешно време технологичния процес във всички термични и ядрени електроцентрали се основава на цикъла на Ренкин. Обичайното работно тяло е вода и водна пара. Кратка справка за особеностите на на цикъла на Ренкин е направена по-долу с позоваване на $T-s$ диаграмата и топлинната схема показани на фиг. 1. Термодинамичната теория на топлинните двигатели посочва, че за да е налице непрекъснато преобразуване на топлинната енергия в механична работа е необходимо към технологичния цикъл непрекъснато да се подава и отвежда топлина. Всеки термодинамичен цикъл се състои от затворена последователност от термодинамични процеси. В случая подаването на топлината към работното тяло Q_1 се извършва в изпарител чрез изобарно-изотермичния процес 2-3. В резултат, работното тяло преминава от течно в газообразно състояние. В турбината се извършва адиабатен процес на разширение 3-4, при което се получава механичната работа L_T използвана за задвижване на ел. генератор, респ. за производство на ел. енергия. Налягането на работното тяло намалява многократно. Отвеждането на топлината от работното тяло Q_2 се извършва в кондензатора чрез изобарно-изотермичния процес 4-1. При това работното тяло преминава обратно от газообразно в течно състояние. В помпата налягането се повишава, с което цикълът се затваря.



Фиг. 1 Термодинамичен цикъл на Ренкин;

От показаното в $T-s$ диаграмата се вижда, че цикълът се осъществява между две температурни състояния – високо, при подаването на топлината и ниско, при отвеждането на топлината. Колкото е по-голямата разликата между тези две температурни състояния толкова е по-ефективен процеса на енергопреобразуване. Исторически погледното в продължителен период от време единственото работно тяло, с което се осъществява цикъла на Ренкин е вода, респ. водната пара. В края на 20 век се появява интерес към използване и на други флуиди. Причините за това са много, но една от тях може много добре да се опише с показаното на фиг. 2.



Фиг. 2 Термодинамични свойства на различни флуиди изобразени в T - s диаграма;

В техническата термодинамика за онагледяване и пресмятане на параметрите на различни термодинамични процеси и цикли много често се използва топлинната T - s диаграма. Характерна за нея е „камбановидната“ крива линия описваща различни състояния на работното тяло. Лявата част на кривата (наричана много често, лява гранична крива) описва състоянието „наситена“ (или още кипяща) течност. Дясната част на кривата (наричана много често, дясна гранична крива) описва състоянието „сухи наситени“ пари на съответния флуид. Зоните формирани от тези криви линии описват състоянието „течност“ (наляво от лявата гранична крива), състоянието „прегрети“ пари (надясно от дясната гранична крива) и състоянието двуфазен флуид (пари плюс течност) в зоната между двете гранични криви. Различните флуиди с които може да се осъществи цикъл на Ренкин могат да се разделят на три множества. Към към първото от тях спадат така наречените „сухи“ флуиди. При тях и дясна гранична крива е наклонена наляво (фиг. 2а). Това улеснява тяхното практическо приложение. За тях процесът на разширение в турбината започвайки от състояние „сухи наситени“ пари“ протича изцяло в областта на прегретите пари – процеса 1-2 на фиг. 2б. С други думи понижаването на температурата в процеса на разширение не води до „овлажняване“ на съответния флуид – от там и названието „сухи“ флуиди. Подобно е поведението и на „изоенталпийните“ флуиди, при които дясната гранична крива всъщност е вертикална права.

В турбина работеща с влажни пари възникват две неблагоприятни явления – допълнителни загуби на енергия от влажност и ерозионно износване на лопатъчния апарат [1]. Работата с влажни пари е присъща за така наречените „мокри“ флуиди. За тях процесът на разширение в турбината започвайки от състояние „сухи наситени“ пари протича изцяло във „влажната“ област. Типичен представител на „мокрите“ флуиди е водата, респ. водните пари. За избягване или ограничаване на споменатите по-горе загуби на енергия от влажност и ерозионно износване се налага допълнително повишаване на температурата на водните пари над температурата на изпарение преди насочването им към турбината – респ. прегриване както е показано състоянието в т. 3 от T - s диаграмата на фиг. 1. Такова прегриване е технически възможно и икономически оправдано при изгаряне на традиционните органични горива. При използване на ниско-температурен топлинен източник обаче прегриването на работното тяло е технически трудно и много

често икономически неоправдано. Тогава на помощ идва използването на органичните флуиди като пентан, толуен, силоксани и др. повечето от които са „сухи“. За тях е присъщо още че имат съществено по-ниска температура на кипене от водата, т.е. е възможно изпарението да се осъществи при по-високо налягане отколкото в случая с водните пари при една и съща температура на двата флуида. С други думи, прилагането им при ниско-температурен топлинен източник позволява налягането на произведените пари да бъде достатъчно високо за осъществяването на ефективен енергопреобразуващ процес. Използването на органични флуиди в качеството им на работно тяло в цикъла на Ренкин води до появата на съответното название - Органичен цикъл на Ренкин (ОЦР). ОЦР дава възможност ефективно да се използват топлинни източници с температура под 300 °С [2]. Приложенията обхващат слънчева топлинна енергия, геотермална енергия, биомаса, но най-вече преобразуването в ел. енергия на отпадна топлина от различни индустриални процеси [3]. Както бе посочено, настоящото изследване касае прилагането на ОЦР за утилизиране на отпадна топлина от содорегенерационен котелен агрегат (СРКА). Определянето на термодинамичните параметри на органичните флуиди в рамките на математичното моделиране е трудоемка задача. Нейното решаване може да се облекчи и ускори чрез използването на подходящ софтуер. С негова помощ предварително бе съставен и верифициран математичен модел на СРКА.

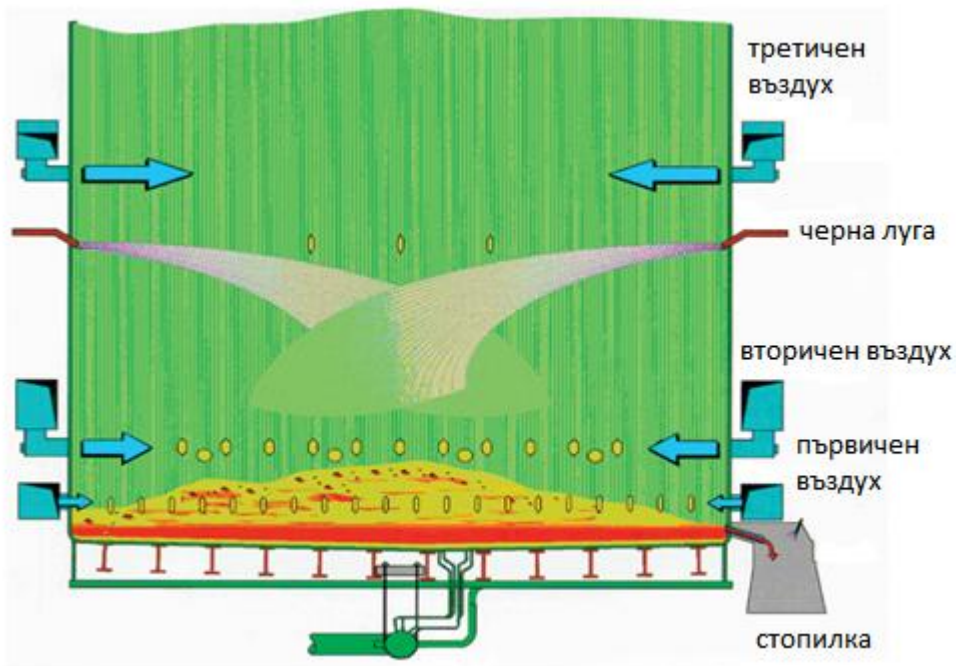
Математично моделиране на СРКА

Основното предназначение на СРКА е осъществяване на регенерацията на химикали употребявани в процеса на целулозно – хартиеното производство. Главното гориво на СРКА е химикал наричан черна луга, който се явява отпадъчен продукт при производството на целулоза по сулфатния метод. Черната луга се състои от голям брой органични и неорганични съединения. Нейния състав зависи от използваните дървесни видове, метода на изваряване на дървесината и процеса на производство на целулозата. Органичната част от черна луга се изгаря в пешната камера на СРКА. Черната луга е едно от най-ниско калоричните горива. Това е така, защото голяма част от нея е съставена от неорганична част с висока съдържание на влага и пепел. Този състав затруднява изгарянето и налага използването на поддържащо гориво мазут при работа на котела с намалено паропроизводство.

Типичната конструкция на пешната камера (ПК) на СРКА е показана на фиг. 3. Въздухът за горене се подава на три нива, съответно първичен, вторичен и третичен. На дъното на ПК се натрупва стопилка от химикалите съдържащи се минералната част на лугата. То се конструира под наклон и стопилката се извежда от специално предназначени улеи.

Процесът на изгаряне на сулфатната луга, както и натроновата може да се раздели на три последователни етапа:

- Изсушаване на лугата;
- Пиролиза и коксуване на органичния остатък, съпроводен с карбонизация на основата;
- Изгаряне на кокса и втечняване на минералния остатък, съпроводен с редукцията на сулфата;



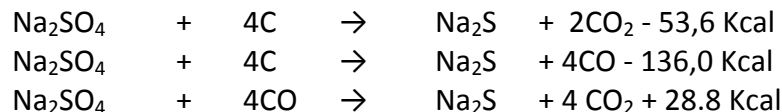
Фиг.3 Потоци в пещната камера на СРКА

Химическите процеси, протичащи в първия стадий през времето на подсушаване на лугата, се състоят в нейното взаимодействие с горещите димни газове в ПК. Освен CO_2 и свободна NaOH , в този стадии могат да вземат участие и SO_2 , SO_3 съдържащи се в газовете, Na_2S и органически свързан Na .

При втория стадии – през времето на пиролиза на органичната част на сулфатната луга, заедно с CH_3OH , фенола и други продукти, се отделят в относително не-голямо количества различни серни съединения: H_2S , CH_3CHS , $(\text{CH}_3)_2\text{S}$, доста сложни алкилсулфиди и някои други летливи продукти. Голяма част от тези продукти се възпламеняват и изгарят, образувайки CO , CO_2 , H_2 , H_2O , SO_2 и увеличават топло съдържанието на газовите смеси. Този процес започва още при количество на вода в лугата от 10 – 15 % и температура 150 – 200 °C.

Третият стадии – характеризира се с изгаряне на кокса се съпровожда със значително повишаване на температурата и стопяване на минералните остатъци. Втечняването на частиците Na_2CO_3 започва при температура 850 °C. Температурата в зоната на горене възлиза на 1200 °C и е в зависимост от количеството на подавания въздух..

За нормално протичане на процеса редуция на Na_2SO_4 до Na_2S , основно значение имат температурата и излишъкът на C , а така също и отсъствието на излишък на въздух в зоната на реакцията. Основни реакции, протичащи през времето на третия стадии на изгаряне на лугата се явяват реакциите на редуциране на Na_2SO_4 до Na_2S от органичния кокс. Теоретически са възможни следните реакции:



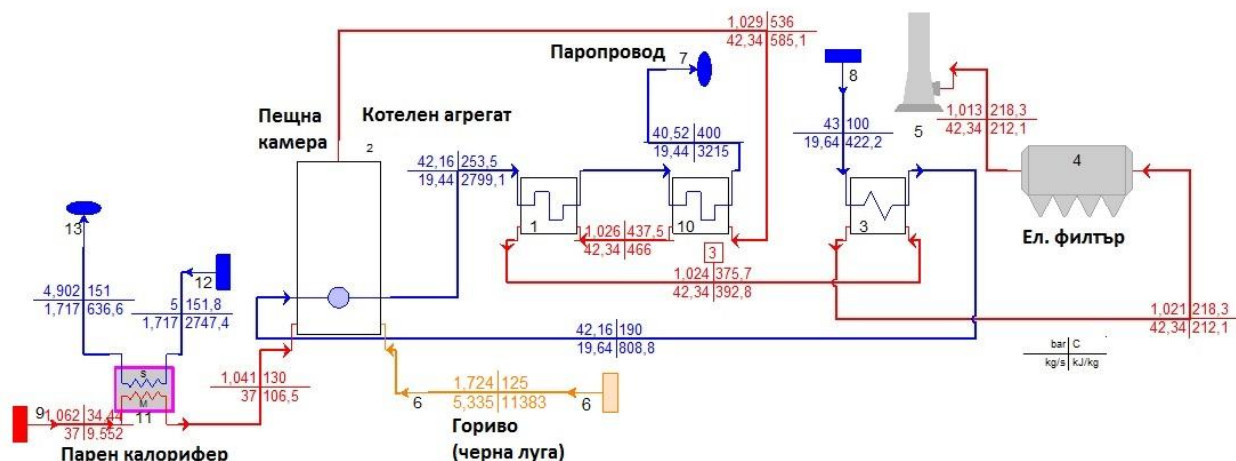
Една малка част от минералните остатъци се изнася с димните газове под формата на летяща пепел и се улавя с електрофилтър разположен след котела. Обичайната конструкция на пароводния тракт на СРКА, която бе взета в предвид при съставянето на изчислителната схема на агрегата включва двубарабанен вертикално разположен изпарителен сноп с естествена циркулация и изцяло екранирана ПК. Конвективните нагревни повърхности се състоят от паропрегревател и економайзер.

Тъй като в горивния процес, респ. при генерацията на димните газове участва почти изключително само органичната част на черната луга, то нейния елементен състав бе заложен като важна част от входните данни на модела, табл. 1:

Таблица 1. Елементен състав на работна маса на черната луга – органична част

Елемент	Съдържание в тегловни %
Въглерод	42,00%
Водород	5,00%
Сяра	1,60%
Кислород	20,00%
Азот	1,40%
Влага	30,00%
Долна топлотворна способност	11 176 kJ/kg

За целите на математичното моделиране в настоящото изследване бе използван софтуерния продукт "Thermoflex", създаден от компанията Thermoflow, Inc. [4]. Той притежава нужните изчислителни възможности за решаване на горепосочените задачи. Изчислителната схема възприета при съставянето на математичния модел е показана на фиг. 4. Подгряването на въздуха за горене на СРКА се осъществява посредством парни калорифери до температура от порядъка на 130°C. За калориферите се използва влажна пара от колектор собствени нужди в ТЕЦ, който от своя страна се захранва от регулируемо пароотнемане от парна турбина с мощност 17 MW. Температурата на изходящите димни газове в експлоатационни условия е относително висока, като варира между 210 и 230°C. За изчисленията е приета средна температура 218°C. Дебита и останалите параметрите на произведената прегрята пара е съобразени с характерните експлоатационните такива и са входни данни. Същото важи и за повечето от останалите параметри на СРКА като коефициент на излишък на въздух в ПК, параметри на подхранващата вода, параметри на парата за калориферите и др. С така разработения симулационен модел бяха извършени пресмятания на топлинните и масовите баланси на елементите на инсталацията.



Фиг. 4 Изчислителна схема на СРКА

Основна цел на математичното моделиране бе получаване на информация за характеристиките на изходящите димни газове – дебит, състав и енталпия. Тези, както и основните параметри на потоците от и към основните съоръжения също са показани на изчислителна схема на фиг. 4. С оглед верификация на математичения модел в табл. 2 са представени за сравнение данни от експлоатационни измервания и стойности за съответните параметри получени с математичното моделиране.

Таблица 2. Експлоатационни и изчислени параметри на СРКА

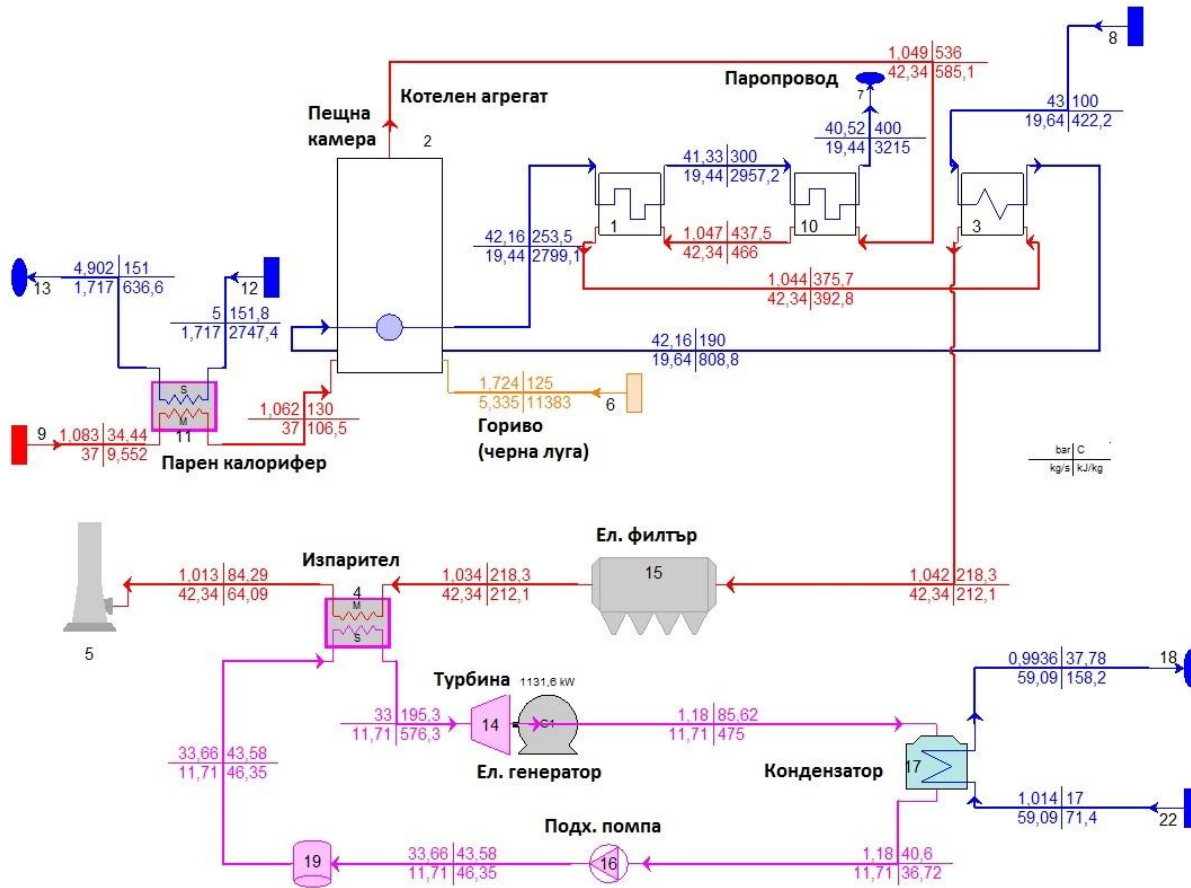
Параметри	Експлоатационни параметри	Параметри получени с мат. модел
Дебит горивото, kg/s	5,3	5,3
Температура на горивото, °C	125	125
Дебит на въздуха, kg/s	37	37,6
Температура на въздуха пред калорифера, °C	35	35
Температура на въздуха след калорифера, °C	130	130
Дебит подхранваща вода, kg/s	20	20
Температура подхранваща вода, °C	105	105
Дебит прегрята пара, kg/s	19,4	19,4
Дебит на пара за калорифера, kg/s	1,72	1,72
Температура на изходящи ДГ, °C	218	218
Дебит на изходящи ДГ, kg/s	42,3	43
Водни пари в ДГ, %	15,6	17,46
Кислород в ДГ, %	3,01	2,95
Въглероден диоксид в ДГ, %	12,7	12,4
Азот в ДГ, %	67,6	66,18

Очевидно пресмятанията с математичния модел са достатъчно представителни и моделът може да се използва за предвидените в изследването анализи.

Математично моделиране на Органичен цикъл на Ренкин към СРКА

Както бе посочено по-горе температурата на изходящите от СРКА димни газове в експлоатационни условия е сравнително висока, като варира между 210 и 230°C. Изхвърлянето им директно в атмосферата води до загуби на значително количество топлинна енергия. В настоящиято изследване се предлага тази топлинна енергия да се преобразува в ел. енергия чрез прилагането ОЦР. Това би довело неизбежно до съществено охлаждане на димните газове. От гледна точка на обичайната котелна практика, горепосоченият подход би имал ограничено приложение тъй като охлаждането на димни газове до ниски температури може да предизвика възникване на значителна по обхват нискотемпературна сяркоксисела корозия [5]. Това е сериозен проблем за котлите, в които се изгарят горива със значително съдържание на сяра като мазут и някои лигнитни въглища. При содорегенерационните котли нещата стоят по-различно. Серните оксиди получени в хода на горивния процес участват в химическите взаимодействия в пешната камера. С това се намалява тяхната концентрация в изходящите димни газове, респ. се намалява температурата съответстваща на точката на оросяването им. Експериментално тези ефекти са изследвани в [6], където авторите заключават, че понижаването на температурата на изходящите димни газове на изхода от СРКА не води до възникване и развитие на нискотемпературна сяркоксисела корозия в металните повърхности намиращи се в съприкосновение с тях.

Изхождайки от горепосоченото бе изследвана възможността да се оползотвори отпадната топлина носена от тези газове чрез дълбокото им охлаждане до 70 – 80 °С. За тази цел бе съставен математичен модел на Органичен цикъл на Ренкин и той бе обединен с гореописания математичен модел на СРКА. Изчислителна схема е показана на фиг. 5. Всички основни параметри на СРКА са уеднакваени с тези заложиени в математичния модел описващ неговата самостоятелна работа. Димните газове отделяни от СРКА се явяват източник на топлина за съоръженията в ОЦР.



Фиг. 5 Изчислителна схема на СРКА с утилизация на отпадна топлина с ОЦР

Инсталацията на ОЦР се състои от изпарител, в който постъпват горещите димни газове от СРКА. Те отдават част от своята топлинна енергия и изпаряват флуид с ниска температура на кипене и след това се отвеждат към атмосфера. Изпареният флуид от своя страна преминава през турбина, чиято цел е да преобразува кинетичната му енергия в механична и да задвижи електрически генератор. След преминаването си през турбината флуида отново претърпява фазов преход в кондензатора и с помощта на помпа се връща за повторно изпарение. Охлаждащата вода за кондензатора беше взета за средногодишните стойности на температура от водоизточника. Температурните напори в теплообменниците са съобразени с тези приемани в обичайната инженерна практика. Важно значение за ефективността на инсталация има вида на използвания органичен флуид. В симулационната среда на Termoflex, бяха проведени изследвания с пет различни хладилни агента, респ. n-pentane, pentane, isopentane, R-123 и R-11. За базисни (неизменни) бяха приети параметрите на димният газ напускащ котела. Налягането на работното тяло на входа в турбината се изменяше от 31 до 33 Bar, а налягането в кондензатора или на изода от турбината варираше от 1,1 до 1,3 Bar.

С така разработения симулационен модел бяха извършени пресмятания на топлинните и масовите баланси на елементите на инсталацията. Основните резултатите

от пресмятанията за работно тяло пентан са показани в изчислителна схема на фиг. 5. Именно за този случай се получи най-голяма стойност на произведената електрическа мощност. Този резултат съвпада с изводите представени в [7], според които при температура на топлоносителя до 250 °С, най-висока ефективност се постига при използване на „сухи“ или „изоенталпийни“ флуиди като бутан, пентан, бутен, диметилетер и R-152a. Мощността бруто е 1131. 6 kW, а нетната мощност получена след като се вземе в предвид използваната ел. енергия за собствени нужди е приблизително 1000 kW.

В публикацията [8] се посочва че инвестиционните разходи за изграждане на ОЦР-инсталация с мощност от 1000 kW са 1350 €/kW. При 7500 работни часа на година и средна цена на ел. енергията в страната 40 €/MWh, е възможно да се постигне един напълно задоволителен срок за откупуване на съоръженията от порядъка на 5 год.

Изводи

Утилизирането на ниско-потенциална отпадна топлина от множество пещни процеси дава възможност съществено да се повиши енергийната ефективност на съоръженията. Нейното преобразуване в електроенергия е трудно осъществимо при използване на традиционното в енергетиката работно тяло – водна пара. С настоящото изследване бе демонстрирано че рационално оползотворяване на тези ниско-потенциални топлинни потоци е възможно с използването на работни флуиди, които претърпяват фазов преход при по-ниски температури от тези на водата, респ. с Органичен цикъл на Ренкин.

Литература

1. Попов Д. Парни и газови турбини. Ифодизайн. 2010 г. София;
2. Vankeirsbilck I., B. Vanslambrouck, S. Gusev, M. De Paere. ORGANIC RANKINE CYCLE AS EFFICIENT ALTERNATIVE TO STEAM CYCLE FOR SMALL SCALE POWER GENERATION. 8th International Conference on Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics. 11 – 13 July 2011. Pointe Aux Piments, Mauritius;
3. Vélez F., J. J. Segovia, M. C. Martín, G. Antolín, F. Chejne, A. Quijano. A technical, economical and market review of organic Rankine cycles for the conversion of low-grade heat for power generation. Renewable and Sustainable Energy Reviews. [Volume 16, Issue 6](#), August 2012, Pages 4175-4189;
4. Thermoflow Software. Program overview. https://www.thermoflow.com/Images/PROGRAM_BROCHURE_2015.pdf
5. Тотев Т., С. Бойчева, Б. Игнатов, Б. Ангелов, К. Тодоров. Контрол на емисиите от серен триоксид в ТЕЦ, изгарящ лигнитни въглища. XV Научна Конференция ЕМФ 2010. Созопол, 2010.
6. Vainio E., T. Laurén, N. Demartini, M. M. Hupa. Understanding Low-Temperature Corrosion in Recovery Boilers: Risk of Sulphuric Acid Dew Point Corrosion? Journal of Science & Technology for Forest Products and Processes: VOL.4, NO.6

7. Agromayor P., L. O.Nord. Fluid selection and thermodynamic optimization of organic Rankine cycles for waste heat recovery applications. Energy Procedia. Volume 129, September 2017, Pages 527-534
8. Vanslambrouck B., Organic Rankine Cycle on bio-CHP. Biogas educational courses. January 24th, 2013;

Благодарности

Научните изследвания, резултатите от които са представени в настоящата публикация, са извършени в изпълнение на научно-изследователски проект на ТУ-София в помощ на докторанти № 171ПД0021-02