



ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ – СОФИЯ

Факултет Енергомашиностроителен

Катедра „Топлоенергетика и ядрена енергетика“

Маг. инж. Диляна Димитрова Колева

**Усъвършенстване на съоръжения и системи в
промишлени ТЕЦ**

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

на дисертация за придобиване на образователна и научна степен
"ДОКТОР"

Област: 5. Технически науки

Професионално направление: 5.4. Енергетика

Научна специалност: "Енергопреобразуващи технологии и системи"

Научен ръководител: проф. д-р инж. Димитър Попов

СОФИЯ, 2018 г.

Дисертационният труд е обсъден и насочен за защита от Катедрения съвет на катедра „Топлоенергетика и ядрена енергетика“ към Факултет Енергомашиностроителен на ТУ-София на редовно заседание, проведено на 05.11.2018 г.

Публичната защита на дисертационния труд ще се състои на 05.03.2019 г. от 15:00 часа в Конферентната зала на БИЦ на Технически университет – София на открито заседание на научното жури, определено със Заповед № ОЖ-5.4.-05/03.12.2018 г. на Ректора на ТУ-София в състав:

1. Проф. д-р инж. Тотю Иванов Тотев – председател
2. Проф. д-р инж. Димитър Ангелов Попов – научен секретар
3. Проф. д-р инж. Лилияна Зашкова Стоянова
4. Доц. д-р инж. Нина Янкова Пенкова
5. Доц. д-р инж. Васил Янев Йорданов

Рецензенти:

1. Проф. д-р инж. Лилияна Зашкова Стоянова
2. Доц. д-р инж. Нина Янкова Пенкова

Материалите по защитата са на разположение на интересуващите се в канцеларията на Факултет Енергомашиностроителен на ТУ-София, блок №2, кабинет № 2344.

Дисертантът е редовен докторант към катедра „Топлоенергетика и ядрена енергетика“ на факултет Енергомашиностроителен. Изследванията по дисертационната разработка са направени от автора като някои от тях са подкрепени от научноизследователски проекти.

Автор: маг. инж. Диляна Колева

Заглавие: *Усъвършенстване на съоръжения и системи в промишлени ПТЕЦ*

Тираж: 30 броя

Отпечатано в ИПК на Технически университет – София

I. ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД¹

Актуалност на проблема

Спестяването на енергия в бита и промишлеността е винаги актуална задача за страна сравнително бедна на енергийни ресурси, каквато е България. То води до подобряване и на параметрите на околната среда, тъй като се съпътства с намаляване на емисиите на вредности, получавани при изгарянето на съответните горива.

В индустриалния сектор намаляването на емисиите на вредности в периода до 2025 г. се очаква да се основава на прилагането на наличните най-добри технологии и е свързано най-вече с повишаване на енергийната ефективност. Всички промишлени предприятия следва постоянно да насочват своите усилия към рационално използване на първичната енергия, както и да утилизират пълноценно отпадната топлина от производствените си процеси. Прилагането на тези решения ще бъде двигател за постигане на висока енергийна ефективност на производството.

Енергоемките промишлени сектори са постигнали известен напредък в преминаването към най-добри практики и подобряване на енергийната ефективност на процесите, но има още много области, в които първичната енергия се използва неефективно.

Протичането на голяма част от технологичните процеси в различни отрасли на промишлеността е съпроводено с отделянето на отпадни газове, въздух, пара и други, чиято висока температура позволява те да бъдат използвани като енергоносител в други процеси. За оползотворяването на тази отпадна топлина в практиката се използват различни методи, като определящи фактори при избора от една страна са параметрите на отпадната топлина - температура, количество и химичен състав, а от друга - изискванията на енергоконсумиращата система. С оглед на горепосоченото в дисертационния труд се изследват и предлагат решения за усъвършенстване на енергопреобразуващи съоръжения и системи в промишлени ТЕЦ.

Цел на дисертационния труд, основни задачи и методи за изследване

Целта на дисертационния труд е да се направи анализ на енергийната ефективност и да се предложат мерки за нейното повишаване в един от най-древните и енергоемки промишлени отрасли – производството на целулоза и хартия. Изследването е насочено към усъвършенстването на енергопреобразуващи съоръжения и системи в реално предприятие от този бранш. След предварителен и задълбочен анализ на съществуващото положение, се идентифицират основните източници на отпадна топлина при производството на целулоза и хартия в предприятието, прилагащо типични за този отрасъл технологии. На базата на тези анализи и проучвания се подбира рационален подход за утилизиране на отпадната топлина, съобразен с особеностите на съответния източник. С методите на математичното моделиране се изследват иновативни технологични решения за нейното пълноценното енергопреобразуване, с акцент върху производството на допълнителни количества електроенергия.

Очакваният резултат включва постигането на значително повишаване на енергийната ефективност на цялостното производство. Допълнителна цел е и реализацията на значителен

¹ Информацията по тази част е с препоръчителен обем 2-3 страници

екологичен ефект от намаляване на потреблението на природни суровини, съчетано с икономически изгодна технология за ограничаване на емисиите парникови газове.

Поставените научно-изследователски задачи за постигане на дефинираната цел на дисертационния труд са фокусирани в следните направления:

- Литературен обзор на технологичните процеси при производството на целулоза и хартия от историята до най – добрите практики в наши дни.
- Анализ на работата и ефективността на топлоенергийните процеси при производството на целулоза и хартия в конкретно предприятие.
- Определяне на източниците на отпадна топлина в предприятие за целулоза и хартия. Анализ на подходящи методи за утилизация на отпадна топлина.
- Експериментално измерване и математично моделиране на процесите, свързани с източниците на отпадна топлина, с цел определянето и.
- Изготвяне и валидиране на числен модел в компютърна симулационна среда на получените резултати от трите изследвани източника на отпадна топлина и прилагането му към последващо изследване.
- Изготвяне на числен модел в компютърна симулационна среда с подходящи методи за утилизация на отпадна топлина, приложени към математичните модели, изготвени за източниците на отпадна топлина.
- Анализи и изводи на получените резултати.

На фигура 1 е представена графично структурата на дисертационния труд:



Фигура 1. Структура на дисертационния труд

Научна новост

В дисертационния труд се предлагат и изследват иновативни подходи за утилизация на нископотенциална отпадна топлина, отделяна от технологичните процеси при производството на целулоза и хартия. Енергопреобразуването се осъществява посредством

прилагането на Органичен Цикъл на Ренкин. Изследвана е ефективността на термодинамичния цикъл при използването на различни флуиди в качеството им на работно тяло. Анализите са проведени с методите на математичното моделиране чрез прилагането на подходящ програмен продукт.

Практическа приложимост

Предложените решения за оползотворяване на нископотенциална отпадна топлина, отделяна от технологичните процеси при производството на целулоза и хартия, са технически приложими, тъй като основните съоръжения, необходими за тяхната реализация са налични на пазара. Представената кратка икономическа оценка доказва бързата възвращаемост на вложените средства за изграждане на съответните инсталации.

Апробация

Изследванията са извършени в предприятие за производство на целулоза и хартия. Съставените и използвани в изследването математични модели са валидирани чрез сравнения на основни параметри, получени от пресмятанията със съответния софтуер, с данни от измервания, проведени за реално съществуващи съоръжения и системи.

Публикации

Основни постижения и резултати от дисертационния труд са публикувани в седем научни статии по темата на дисертационния труд, от които една е самостоятелна. Пет от статиите са публикувани и докладвани на научни конференции, а останалите две са публикувани в научно списание.

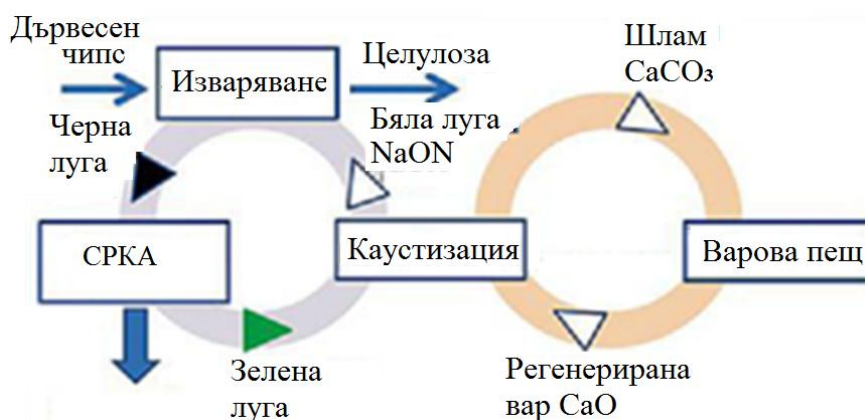
Структура и обем на дисертационния труд

*Дисертационният труд е в обем от **140** страници, като включва увод, 4 глави за решаване на формулираните основни задачи, списък на основните приноси, списък на публикациите по дисертацията и използвана литература. Цитирани са общо **88 литературни** източници като **79** са на латиница и **7** на кирилица, а останалите **2** са интернет адреси. Работата включва общо **50** фигури и **48** таблици. Номерата на фигурите и таблиците в автореферата съответстват на тези в дисертационния труд.*

II. СЪДЪРЖАНИЕ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

ГЛАВА 1. ЕНЕРГИЙНА ЕФЕКТИВНОСТ НА ОСНОВНИТЕ ТОПЛОЕНЕРГИЙНИ СЪОРЪЖЕНИЯ В ЦЕЛУЛОЗНО – ХАРТИЕНАТА ПРОМИШЛЕННОСТ

В дисертационния труд е разгледан процеса на производство на целулоза и хартия, в който важна роля играят множество топлоенергийни съоръжения и системи. Сулфатните процесите са най-често прилаганият производствен метод за химическо получаване на целулоза. На фиг. 1.1 е представена технологична схема на процеса на производство на крафт целулоза.



Фигура 1.1 Технологичен процес на производство на целулоза

Исходната суровина - дървесен чипс се изварява с бяла луга до получаването на целулоза. Черната луга от промиването на целулозата има ниско съдържание на абсолютно сухо вещество и трябва да се уплътни преди да се подаде за изгаряне в Содорегенерационен котел (СРК). Стопилката от Содорегенерационния котел се разтваря във вода или слаба бяла луга за производство на зелена луга, която се състои основно от натриев сулфид (Na_2S) и натриев карбонат (Na_2CO_3). Зелената луга се филтрира и каустизира с вар и натриев карбонат (Na_2CO_3), преработва се в натриев хидроксид (NaOH), до получаване на бяла луга за производство на целулоза. Химическият калциев карбонат, получен при каустизацията се отделя от Бялата луга, промива се и се подава в специална пещ под формата на гъста суспензия (шлам), за да се регенерира вартата. Отпадната дървесина се изгаря в енергиен котел с „кипящ“ слой. Произведената пара заедно с тази от СРК се използва при изваряването на дървесния чипс и производството на хартия.

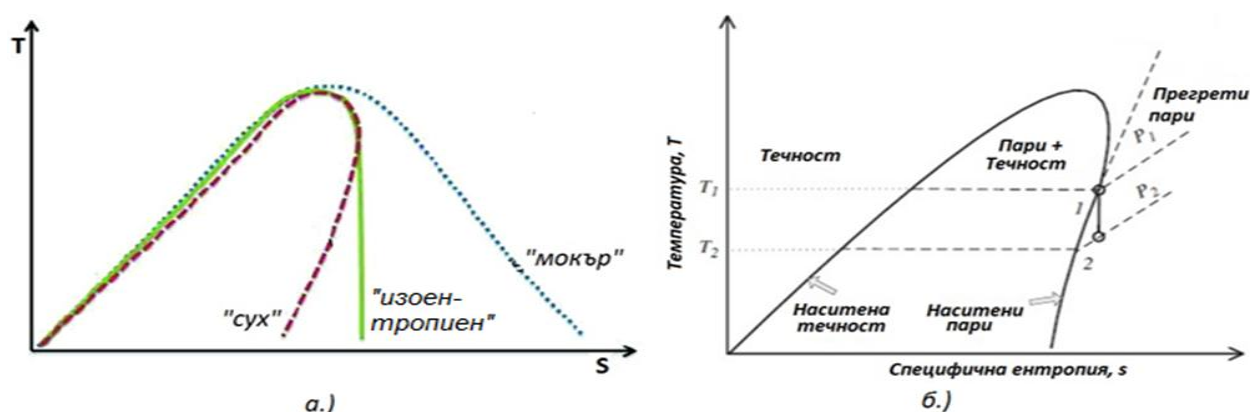
Критичният анализ на технологията за производство на целулоза и хартия показва, че нейният основен приоритет е самото производство на тези продукти, докато проблемите на енергийната ефективност са оставени на заден план или въобще не се анализират и изследват. Целта на дисертационния труд е провеждането на изследвания, целящи повишаване на енергийната ефективност в целулозно-хартиеното производство чрез прилагането на иновативни технологични решения.

Установено бе, че работата на основните топлоенергийни съоръжения и системи, които са част от технологията за производство на целулоза е неефективна от енергийна гледна точка. Този извод в най-голяма степен се отнася за крупни съоръжения като

содорегенерационен котелен агрегат, варо-регенеративна пещ и котел, изгарящ отпадна биомаса. И в трите случая се установява отделянето, респ. изхвърлянето в атмосферата на голямо количество топлинна енергия под формата на горещи димни газове с температура достигаща 260°C , която е целесъобразно да се утилизира.

Отпадната топлина от производствените процеси може да бъде утилизирана по два основни начина – за производство на топлинна енергия чрез подгряване на различни флуидни потоци и за преобразуване на отпадната топлинна енергия в електроенергия. В основните задачи за решаване, предмет на настоящия дисертационен труд е включено изследване и на двата възможни начина, но акцентът е поставен върху производството на ел. енергия предвид на по-голямата и универсална ценност на този краен продукт за обществото като цяло.

Оползотворяването на отпадната топлина с цел производство на електрическа енергия може да се осъществи чрез различни термодинамични цикли. Нейното преобразуване в електроенергия е обаче трудно осъществимо при използване на традиционното в енергетиката работно тяло – водна пара. В дисертационния труд е поставена задачата да се приложи алтернативен подход, при който вместо водна пара като работно тяло в енергопреобразувателния термодинамичен цикъл, да 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. Термодинамичните особености и предимства от използването на органични флуиди може да се илюстрира с диаграмите показани на фиг. 1.4



Фигура 1.4 Термодинамични свойства на различни флуиди изобразени в T-s диаграма

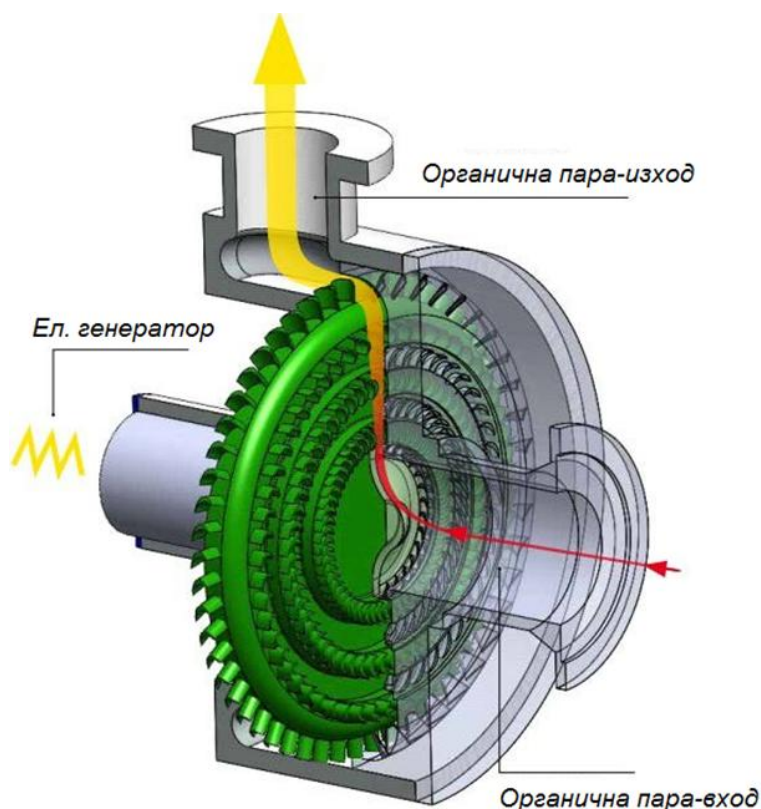
В техническата термодинамика за онагледяване и пресмятане на параметрите на различни термодинамични процеси и цикли много често се използва топлинната T-s диаграма. Характерна за нея е „камбановидната“ крива линия, описваща различни състояния на работното тяло. Лявата част на кривата (наричана много 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 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.

ОЦР дава възможност ефективно да се използват топлинни източници с температура под 300 °С [76]. Приложенията обхващат слънчева топлинна енергия, геотермална енергия, биомаса, но най-вече преобразуването в ел. енергия на отпадна топлина от различни индустриални процеси [78].

Работният флуид играе ключова роля в цикъла. Той трябва не само да има необходимите топлофизични свойства, които съответстват на приложението, но и да притежават химическа стабилност в желания температурен диапазон. Флуидният избор засяга



ефикасността на системата, условията на работа, въздействието върху околната среда и икономическата ефективност [32].

В най-модерните инсталации с ОЦР се използват радиални турбини тип Юнгстрьом. При тях дюзовите и работните лопатки на няколко турбинни стъпала се разполагат в концентрични окръжности, фиг. 1.7. Работното тяло се движи от центъра към периферията. Това дава възможност работните лопатки на първото стъпало да са достатъчно високи, а на последното с не-голяма височина. Вътрешния относителен КПД на тези турбини достига 85%.

Фигура 1.7 ОЦР турбини тип Юнгстрьом

Анализите свързани с прилагането на ОЦР изискват провеждането на многобройни пресмятания с различни флуиди при широк диапазон на изменение на параметрите на работното тяло. Това налага използването на компютиризирани методи на моделиране на процесите. Тяното изучаване и по-специално прилагането на подходящ за целта програмен продукт е друга важна задача за решаване в представения дисертационен труд.

ГЛАВА 2. ПОДОБРЯВАНЕ НА ЕНЕРГИЙНАТА ЕФЕКТИВНОСТ НА СОДОРЕГЕНЕРАЦИОННИ КОТЛИ (СРК)

В предприятията, обработващи дървесина и целулоза с цел производство на хартия, се извършват три основни процеса. Първият е да се изгори органичният материал в черна луга, за да генерира пара с високо налягане. Втората задача е да се регенерират отработените химикали, намиращи се в черната луга. Третият процес е свързан с това да се минимизират изхвърлянията от няколко потока отпадъци от производството по екологосъобразен начин. В котела СРК, концентрирана черна луга се изгаря в пещ и в същото време в нея химикалите от производството на целулозата преминават в състояние на стопилка. Черната луга е съставена от голям брой органични и неорганични съединения. Количеството и съставът на лугата зависи от дървесните видове, начина на варене на дървесината и процеса на производство на хартия.

Осъществяването на горивният процес в агрегата изисква подаването на въздушен поток, съответстващ на потока гориво. Необходимото количество въздух за изгаряне на единица маса от черната луга зависи главно от съдържанието на влага в нея и от калоричността и. Колкото е по-голяма е калоричност на лугата, толкова повече въздух е нужен за нейното пълно изгаряне. СРК котлите трябва да бъдат в състояние да обработват не само точно определеният вид луга, за която са проектирани, но да работят ефективно и с луга, имаща свойства, различаващи се от проектните.

При проектирането и оценката на производителността се използва елементният състав на съединенията в черната луга. Органичната част се състои от съединения на въглерода, водорода, азота, сярата и кислорода. Черната луга съдържа и голямо количество пепел, като натриеви, калиеви и хлорни съединения.

Изготвянето на материалните и енергийни баланси на содорегенерационните котли е важна инженерно-техническа задача. То се прави с цел оценяване на икономичността и ефективността на предприятието с оглед управлението му с възможно най-ниски разходи. В настоящото изследване провеждането на материален и енергиен баланс на СРК предшества математичното моделиране на процесите в котлоагрегата и цели както определяне на най-важните показатели на неговата работа, така и обосноваване на избора на подходящ за целите на моделирането софтуер.

От проведените масов и топлинен баланс се вижда ясно ролята, която има СРК в технологията за производство на целулоза. От една страна СРК се явява химически реактор, в който се обработват нужните за производството химикали. Тази му роля очевидно е основна, тъй като от нея и нейната ефективност зависи основното производство в целулозния завод. От друга страна в СРК се произвежда значително количество прегрята пара, т.е. СРК в тази си роля е енергиен котелен агрегат.

Изчислителните анализи на топлоенергийните съоръжения и инсталации се провеждат за стационарни и динамични режими на работа. Динамичните режими възникват и протичат при пускане и спиране. За анализиране на топлинната икономичност, определящи се явяват стационарните режими, в които съоръженията и инсталациите работят през по-голяма част от времето.

Изчислителните анализи на стационарните режими на топлоенергийните съоръжения изискват използването на основни зависимости от техническата термодинамика, топло и

масообмена и механиката на флуидите. Изчислителните процедури обикновено се свеждат до използване в неявен вид на уравнението на състоянието, уравнението на непрекъснатостта, уравнението за запазване на количеството на движението, уравнението за запазване на енергията и обобщени емпирични зависимости за пресмятане на повечето загуби на енергия в отделните съоръжения.

Настоящото изследване е фокусирано върху прилагането на методи и средства за оползотворяване на отпадна топлина от топлоенергийни съоръжения в завод за производство на целулоза и хартия и по – конкретно СРК. В днешно време интересът към утилизирането на по-голяма част от енергията на димните газове е засилен с оглед и на намаляване на емисиите на вредности. За целта е необходимо понижаване на температурата на димните газове. Този подход обаче има един съществен недостатък. Понижаването на температурата на димните газове може да премине границата, при която започва интензивна нискотемпературна серниста корозия (така наречената точка на росата). При горене на черна луга, малка част от образуваният SO_2 допълнително се окислява до SO_3 . За целта на изследването бе направен анализ, за да се оцени риска за възникване на корозия върху котелните нагревни повърхности при температури на димните газове в интервала от 70 °C до 110 °C. Тези температури традиционно се избягват поради възможността да се премине точката на оросяване на корозионно агресивните съставки на димните газове. При проведени многобройни изследвания и измервания от водещи специалисти в областта на теорията и практиката на СРК, не са били установени условия за възникване на нискотемпературна корозия. По-специално резултати от експериментално изследване в тази насока са представени в [74]. Авторите заключават, че понижаването на температурата на изходящите димни газове на изхода от СРК не води до възникване и развитие на нискотемпературна сяроокисела корозия. Това показва, че температурата на димните газове може да бъде намалена значително, което от своя страна ще доведе до съществено подобряване на енергийната ефективност на целулозното производство.

Усъвършенстване на работата на СРК чрез замяна на парните калорифери с въздухоподгревател

Обичайната конструкция на пароводния тракт на СРК включва двубарабанен вертикално разположен изпарителен сноп с естествена циркулация и изцяло екранирана пещна камера . Конвективните нагревни повърхности се състоят от паропрегревател и економайзер . В разглеждания случай подгръвянето на въздуха се осъществява с пара от регулируемо пароотнемане от парната турбина с налягане 5 Bar и температура около 200 °C. Този начин на подгръвяне на въздуха е типично решение за повечето СРК, намиращи се понастоящем в експлоатация.

Предлаганото в настоящото изследване преминаване към схема с директно подгръвяне на горивния въздух ще доведе до значително намаляване на температурата на димните газове, напускащи котела. Очакваният полезен краен резултат ще включва намаляването на разхода пара за собствени нужди.

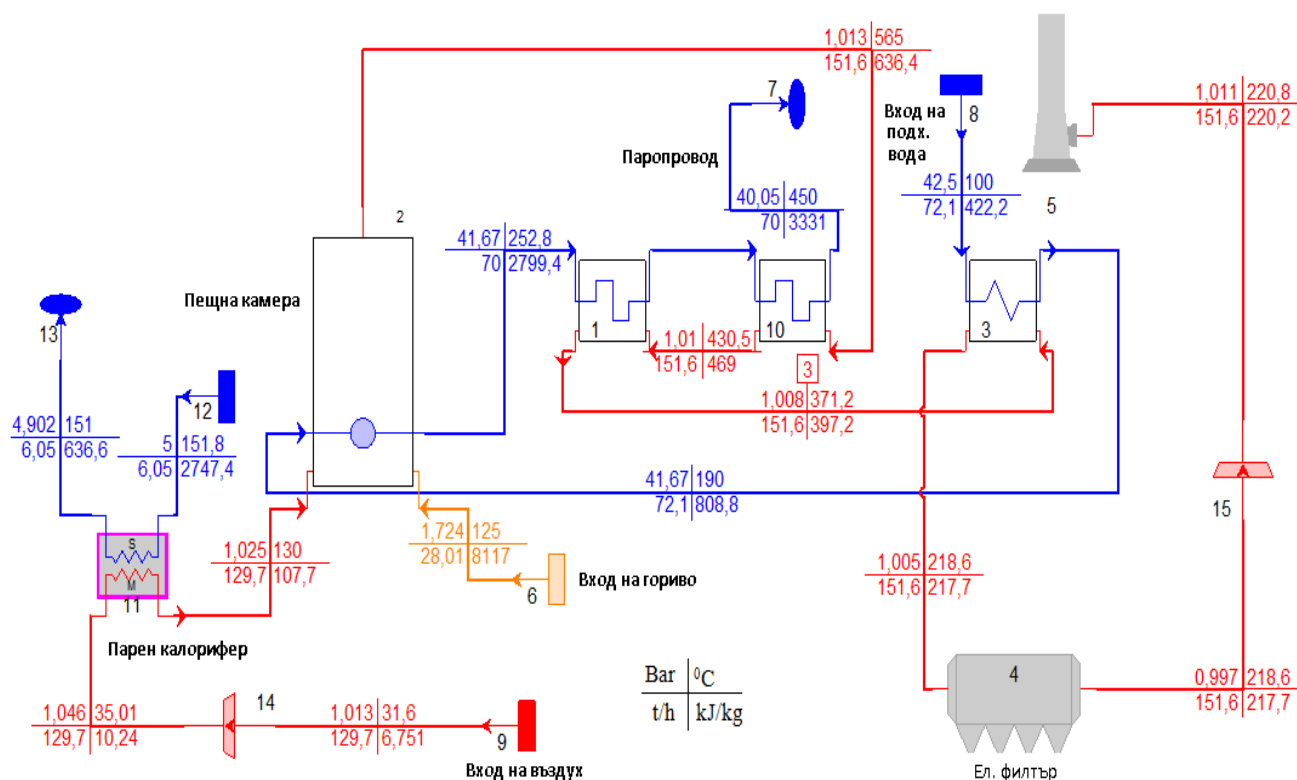
Бъдещият въздухоподгревател ще се разположи на изхода от СРК, респ. след електрофилтъра, комина и съответните газоходи и. ще представлява допълнително аеродинамично съпротивление. Появата на допълнително аеродинамично съпротивление може да затрудни работата на съществуващите въздушни и димни вентилатори. С оглед

получаването на по-пълна количествена представа за ефектите от присъединяването на въздухоподгревателя към СРК, бе съставен опростен математичен модел на агрегата. За целта бе използван софтуерният продукт Thermoflex™.

За да функционира коректно математичният модел се нуждае от множество входни данни, съобразени с работата на СРК в реални експлоатационни условия. Въведените стойности на основните параметри, описващи работата на СРК съвпадат напълно с тези, използвани при съставянето на материалния и топлинен баланс.

Изчислителната схема възприета при съставянето на математичния модел е показана на фиг. 2.9. Към настоящият момент подгряването на въздуха за горене на СРК се осъществява посредством парни calorifiers до температура от порядъка на 130°C. За calorifierите се използва 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 са съобразени с експлоатационните такива. Същото важи и за повечето от останалите параметри на СРК като дебит на горивото, коефициент на излишък на въздух, параметри на парата за calorifierите и др.

За всеки елемент от схемата са показани параметрите на съответните флуиди за вход/изход, налягане в Bar, температура в °C, дебит в t/h и енталпия в kJ/kg. След печната камера 2 димните газове (линии в червено) преминават през двустъпален паропрегревател (1 и 10), економайзер 3, ел. филтър 4, димен вентилатор 15 и през комина 5. Подхранващата вода 8 постъпва най-напред в економайзера 3, след това преминава последователно през печната камера 2, където се изпарява и през паропрегревателите 1 и 10.



Фигура 2.9 Изчислителна схема на СРК с резултати от пресмятането на модела с подгряване на въздуха за горене с парен calorifier

1. Паропрегревател първо стъпало;
2. Пещна камера;
3. Економайзер;
4. Електрофилтър;
5. Комин;
6. Източник на гориво;
7. Паропровод;
8. Източник на подхр. вода;

9. Източник на въздух;
10. Паропрегревател второ стъпало;
11. Парен калорифер;
12. Пара за калорифера;
13. Кондензат;
14. Въздушен вентилатор;
15. Димен вентилатор;

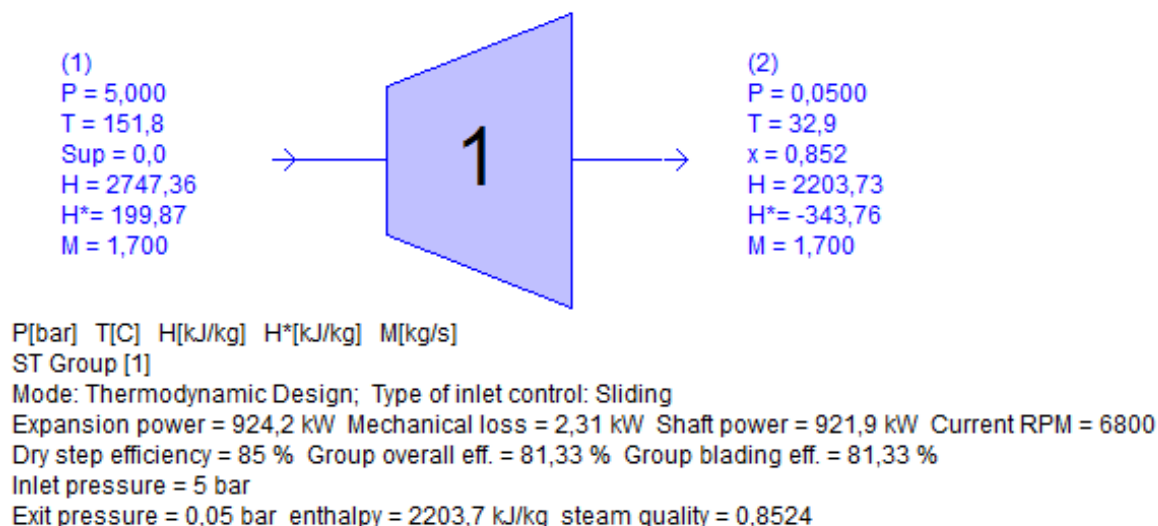
Както бе посочено по-горе, целта на моделирането бе да се симулира номиналния режим на работа СРК и в крайна сметка да се получат достоверни стойности за дебита и състава на димните газове на изхода от СРК, както и на редица други негови параметри. С оглед верификация на така съставения математичен модел в табл. 2.27 са представени данни от експлоатационни измервания и стойности на определен брой параметри от симулационното моделиране на СРК.

Таблица 2.27 Сравнение на стойностите на експлоатационни параметри и параметри от симулационното моделиране на СРК

Параметри	Експлоатационни параметри	Параметри получени с модела
Дебит на черната луга, t/h	28	28,01
Температура на черната луга, °C	125	125
Дебит на въздуха, t/h	130	129,7
Температура на въздуха пред калорифера, °C	35	35,01
Температура на въздуха след калорифера, °C	130	130
Дебит подхранваща вода, t/h	72	72,1
Температура подхранваща вода, °C	105	105
Дебит прегрята пара, t/h	70	70
Дебит на пара за калорифера, t/h	6	6,05
Температура на изходящи ДГ, °C	218	217,7
Дебит на изходящи ДГ, t/h	152	151,6
Водни пари в ДГ, %	21,00	20,15
Кислород в ДГ, %	2,6	2,00
Въглероден диоксид в ДГ, %	11,5	12,82
Азот в ДГ, %	67,6	64,1

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

Предложението за промяна на настоящата инсталация за предварително подгряване на въздуха за горене е свързано с премахването на парните калорифери и инсталирането на въздухоподгревател, използващ топлината на изходящите димни газове. На фиг. 2.10 е представена възприетата изчислителна схема, от която става видно, че за целта се прилага повърхностен теплообменник с тръбен сноп. Направени са съответните корекции и в математичния модел. Въздухоподгревателят е представен с елемент 11.



Фигура 2.12 Параметри на допълнително електро-производство в ЧНН на турбината

Използването на въздухоподгревател вместо парен калорифер дава възможност да се произведе допълнителна ел. мощност от около 900 kW. С това годишното ел. производство на ТЕЦ ще се равнява на: $8\,160 \cdot 900 = 7\,344\,000$ kWh (при 8160 часа годишна използваемост), респ. 7 344 MWh. Преференциалната цена за изкупуване на електрическата енергия от предприятието за текущия регулаторен период е в размер на 149,49 лв/ MWh. Това дава възможност да се пресметне финансовия приход на годишна база:

$$7\,344 \cdot 149,49 = 1\,097\,855 \text{ лв/год.}$$

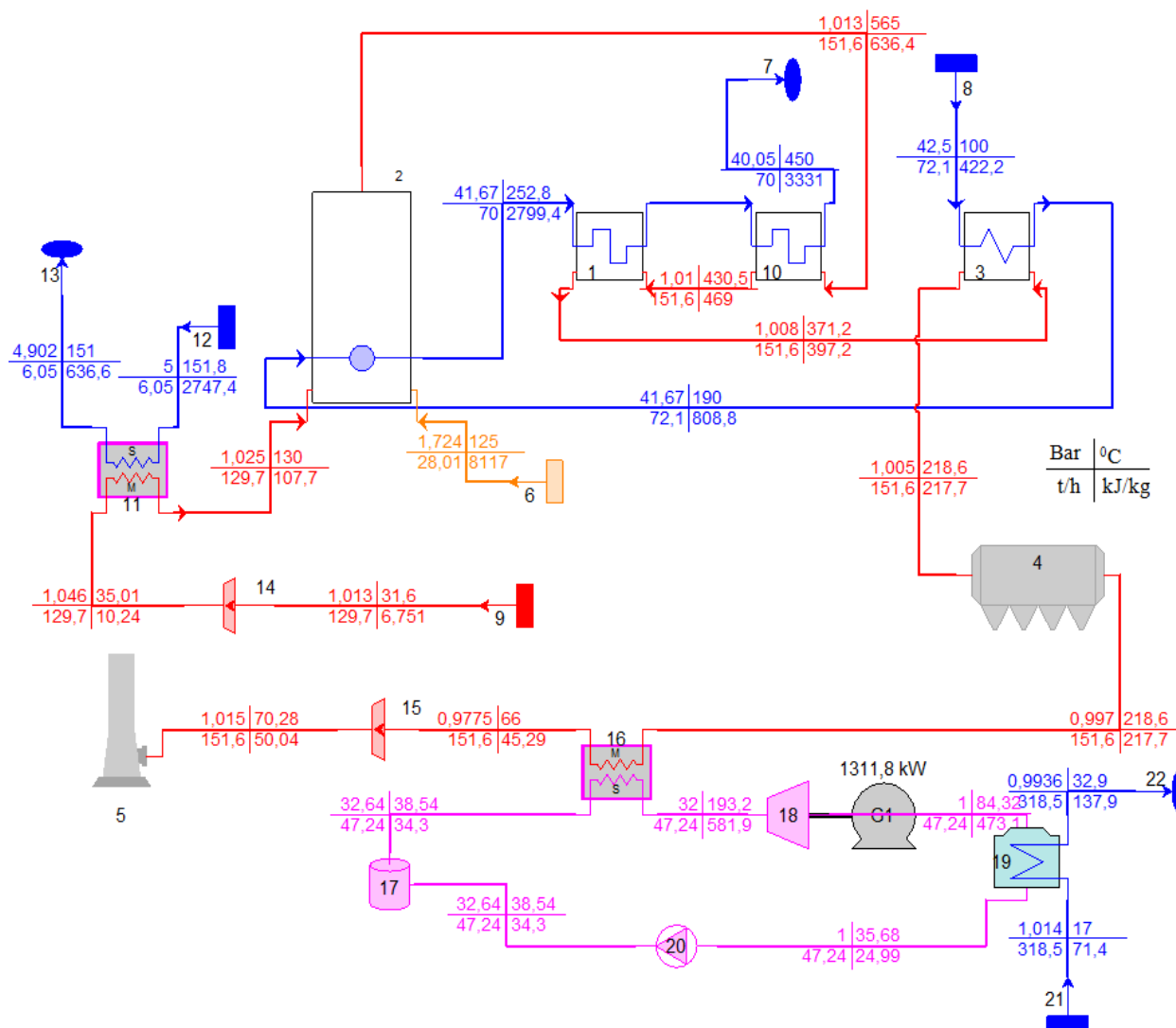
След извършена икономическа оценка на предложения метод, на базата на утвърдена цена за електрическа енергия и проучване на пазара за инвестиционни разходи, се установи, че предложената реконструкция с инсталиране на ВП на димни газове би довела до откупуване на инвестицията за период около 2,8 години, което дава възможност да се потвърди рентабилността на реконструкция.

Усъвършенстване на работата на СРК чрез инсталиране на система за утилизация на отпадната топлина от димните газове с Органичен цикъл на Ренкин

Както бе посочено по-горе температурата на изходящите от СРК 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 настоящото изследване се предлага тази топлинна енергия да се преобразува в ел. енергия чрез прилагането на Органичен цикъл на Ренкин (ОЦР). Изхождайки от горепосоченото бе изследвана възможността да се оползотвори отпадната топлина, носена от тези газове чрез допълнителното им охлаждане до 70 – 80 °C.

За тази цел бе съставен математичен модел на Органичен цикъл на Ренкин и той бе обединен с гореописания математичен модел на СРК. В симулационната среда на Thermoflex, бяха проведени изследвания с пет различни органични флуида, респ. n-pentane, pentane, isopentane, R-123 и R-11. За базисни (неизменни) бяха приети параметрите на димният газ напускащ котела, като изследванията са направени за номиналния режим на работа на СРК. Параметрите на работното тяло на входа в турбината се подбрани така, че от една страна да са максимално

високи и от друга произвежданите пари да са в сухо наситено състояние. На фиг. 2..13 е представена възприетата изчислителна схема с работно флуид за ОЦР пентан.



Фигура 2.13 Изчислителна схема на СРК с присъединена ОЦР инсталация и с резултати от пресмятането на модела – работен флуид penthane

Както се вижда от схемата предаването на топлината на димните газове към работното тяло на ОРЦ става в изпарителя 16. Димните газове отдават част от своята топлинна енергия, подгрявайки и изпарявайки флуид с ниска температура на кипене. След това се отвеждат с помощта на димния вентилатор 15 към атмосферата през комина 5. Изпареният флуид от своя страна преминава през турбината 2. В нея неговата топлинна енергия се преобразува в механична работа с цел задвижване на електрическия генератор G1. След преминаването си през турбината флуида постъпва в кондензатора 19, където отдава топлината си на охлаждащата вода. Там работното тяло отново претърпява фазов преход и се втечнява. Получената течност с помощта на подхранващата помпа 20 се връща в изпарителя за повторно изпарение.

В изследването за температурата на охлаждащата вода за кондензатора бе приета стойност равняваща се на средногодишната стойност на температурата на водата от водоизточника, ползван в целулозния завод - 17 °C. Температурните напори в топлообменниците са съобразени с тези, приемани в обичайната инженерна практика.

Както се вижда от изчислителната схема произвежданата от генератора ел. мощност е 1312kW. С програмния продукт се пресмята и консумираната ел. мощност за собствените нужди, в случая за задвижване на вентилаторите на котела и подхранващата помпа на ОЦР. Съответните стойности са: въздушен вентилатор 133,7 kW, димен вентилатор 211,8 kW, подхранваща помпа на ОРЦ 132,9 kW.

В таблица 2.29 е представен сравнителен анализ за ел. мощност, произвеждана от инсталациите в зависимост от използвания органичен флуид.

Таблица 2.29 Сравнителен анализ на различни видове флуиди

Флуид	Pentane	Isopentane	n-pentane	R 123	R 11
Брутна мощност, kW	1311,8	1268	1163	1301,5	1072,8
За възд. вентилатор, kW	133,7	133,7	133,7	133,7	133,7
За димен вентилатор, kW	211,8	211,8	211,8	211,8	214,8
За подхр. помпа, kW	132,9	141,6	71,3	149,5	61
Нетна мощност, kW	833,40	780,90	746,20	806,50	663,30

Използването на инсталация с ОРЦ дава възможност да се произведе допълнителна ел. мощност от порядъка на 1300 kW. С това годишното ел. производство на ТЕЦ може да се увеличи с близо 10 608 MWh (при 8160 часа годишна използваемост). При преференциалната цена на електрическата енергия на предприятието за текущия регулаторен период от 149,49 лв/ MWh, може да се оцени приходът на годишна база:

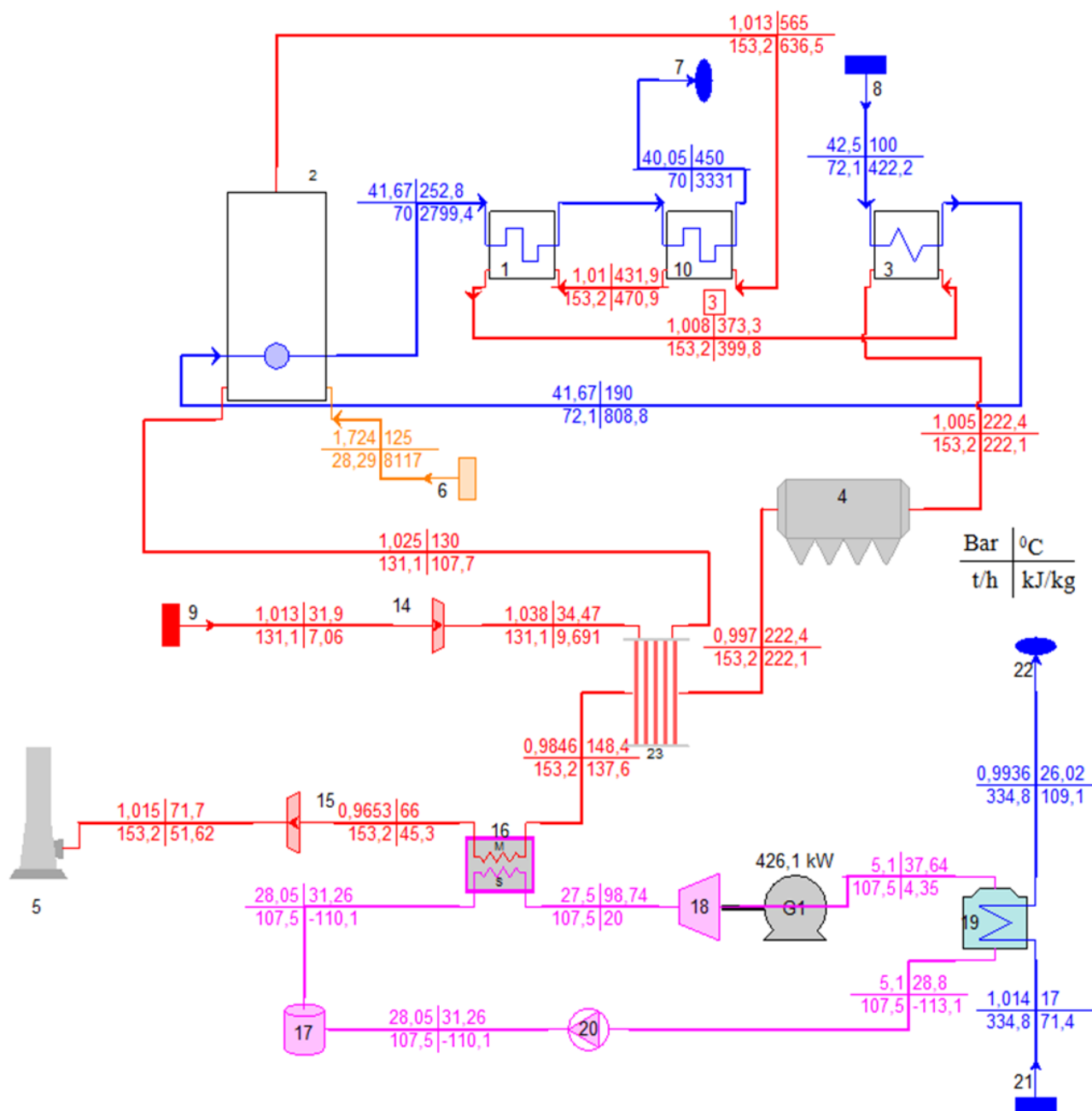
$$10\,608 \cdot 149,49 = 1\,585\,790 \text{ лв/година}$$

В публикация [77] се посочва, че инвестиционните разходи за изграждане на ОЦР инсталация с мощност от порядъка 1000 kW са около 2000 €/kW. Съответно размерът на нужната инвестиция за изграждане на инсталация с ОРЦ към варовата пещ ще се равнява на: $1300 \cdot 2000 = 2\,600\,000 \text{ €}$ или 5 070 000 лв.

При извършена икономическа оценка на метода, на базата на утвърдена цена за електрическа енергия и проучване на пазара за инвестиционни разходи за изграждане на инсталацията, се установи, че използването на метода за производство на ел. енергия с Органичен Цикъл на Ренкин би довела до откупуване на инвестицията за период около 3,2 години

Обединена схема за утилизация на отпадна топлина чрез газово подгръване на въздуха за горене и инсталиране на система за утилизация на отпадна топлина от димни газове чрез Органичен цикъл на Ренкин

При използването на въздухоподгревател температурата на димните газове след него остава относително висока от порядъка на 140 °C. Според [74] температурата на димните газове може да бъде понижена без опасност от възникване на серниста корозия. Поради тази причина се разработи обединен модел на СРК с утилизация на отпадна топлина посредством въздухоподгревател и ОЦР за допълнително производство на електроенергия при използване на работен флуид R227 EA, даден на фигура 2.19. Работният флуид е избран съгласно препоръките.. Както се вижда от фигурата допълнителната електрическа мощност е 426 kW (бруто).



Фигура 2.19 Изчислителна схема на СРК с утилизация чрез обединена схема с ВП и ОЦР – работно тяло R 227 EA

При направен анализ на модела, предложен на фигура 2.18, може да заключим, че общото допълнително производство на електрическа мощност е 920 kW при отпадането на парните калорифери за подгряване на въздуха за горене и 420 kW при използването на ОЦР. Общото количество допълнително произведена мощност е от порядъка на 1350 kW, но това е свързано с изграждане на допълнително две нови инсталации и подмяна на вентилаторите на СРК, което не може да обоснове рентабилност на инвестицията и кратък срок на възвращаемост на инвестиционните разходи.

ГЛАВА 3. ПОДОБРЯВАНЕ НА ЕФЕКТИВНОСТТА НА КОТЛИ С „КИПЯЩ“ СЛОЙ НА БИОМАСА

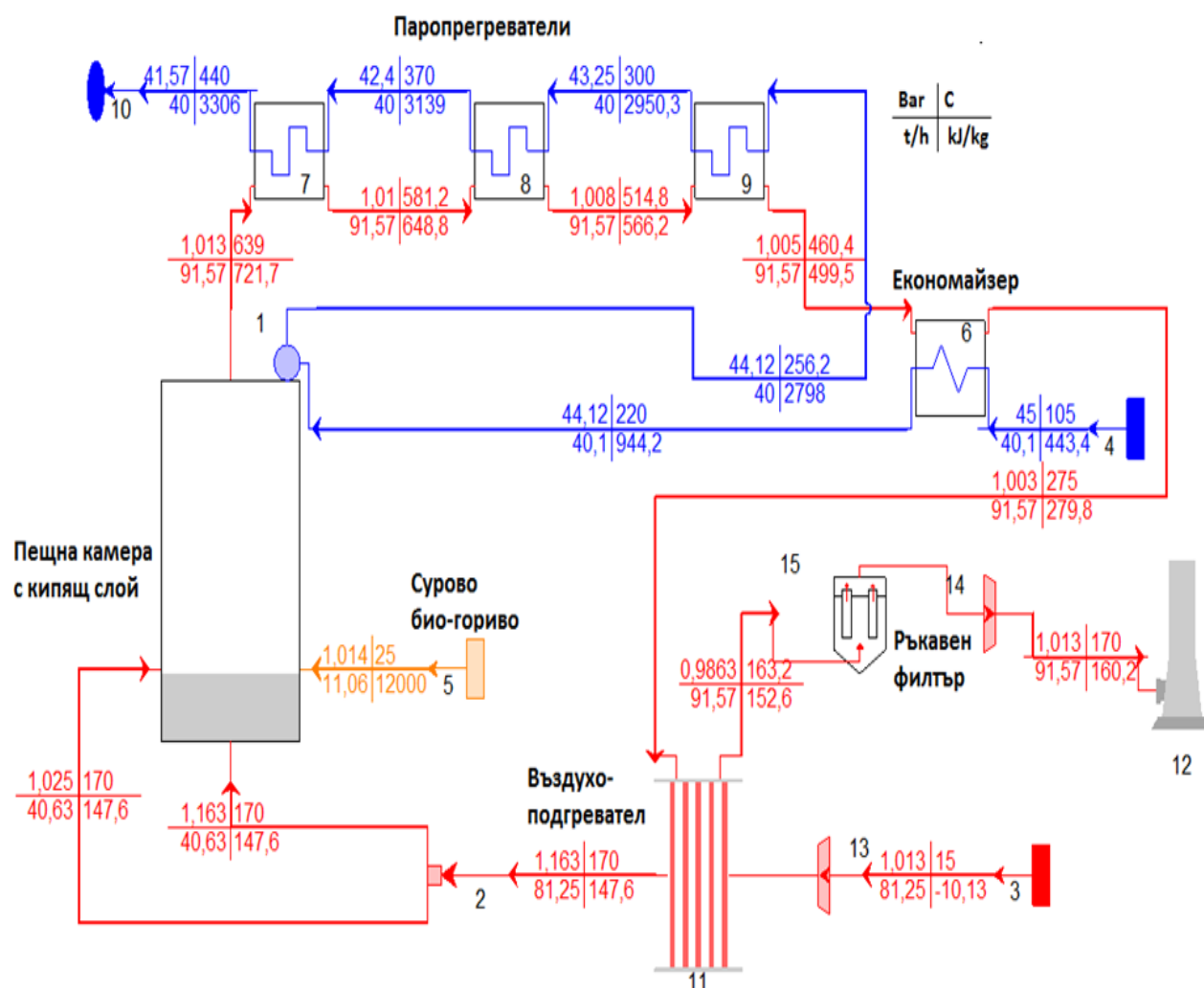
През последните няколко десетилетия възобновяемите енергийни източници се развиват все по – интензивно и подобряването на ефективността на системите, използващи този вид енергия е важна инженерно-техническа задача. Биомасата се разглежда като един от сигурните и значими възобновяеми източници на гориво за производство на електроенергия. Котли на биомаса се изграждат, много често като средство за използване на наличните остатъци от преработката на дървесина и други растителни отпадъци. В по-голямата част от тези случаи биомасата има висока влажност и независимо от това тя се изгаря директно, т.е. без предварително подсушаване. В дисертационния труд се разглежда алтернативен подход. При храненето с гориво на съществуващ котел, биомасата първо да се подсушава посредством използване на топлината на изходящи димни газове от котела и след това да се изгаря. С методите на математичното моделиране са оценени ефектите от предварителното подсушаване върху изменението на основните параметри на котел с кипящ слой.

Предварителното подсушаване на биомасата е технология съдържаща в себе си определен потенциал за намаление на изразходваното високо-влажно гориво и оттам за редуциране на отделяните въглеродни и други емисии на вредности. Има два основни метода на сушене, които могат да бъдат приложени в случая, а именно пасивно и активно сушене. Процесът на пасивно сушене се извършва при продължителен престой на дървесината в открит или закрит склад и е силно зависим от условията на околната среда. При активното сушене, влагата се извежда целенасочено и за кратко време с помощта на подходящ технологичен процес – най-често чрез загряване. В настоящото изследване се прави преглед на наличните сушилни технологии с оглед предварителен подбор на активна технология за сушене на дървесина преди нейното изгаряне в енергиен котел с кипящ слой посредством използването на изходящата топлина на димни газове.

Изчислителната схема, възприета при съставянето на математичния модел на котел на биомаса с „кипящ“ слой е показана на фиг. 3.4. Капацитетът на инсталацията, която е предмет на настоящото изследване, е както следва: паропроизводство 40 t/h прегрята пара с налягане 40 bar и температура 440° C. Максималната температура на димните газове в пещната камера е 870° C. Изгарянето се извършва в пещ с пясъчен кипящ слой. За целите на математичното моделиране в настоящото изследване бе използван софтуерния продукт "Thermodflex", създаден от компанията Thermodflow Inc, описан в дисертационния труд. Той притежава нужните за изследването изчислителни възможности. С негова помощ бе съставен математичен модел на съществуващ котел изгарящ дървесна биомаса в кипящ слой.

Като гориво за инсталацията се използват отпадни дървесни продукти, което я класифицира като инсталация използваща възобновяеми енергийни източници. Използват се следните горива: свежи дървесни кори, утайки от пречиствателна станция, които отпадат от технологичния процес на преработка на дървесината и закупени от местния пазар дървесни отпадъци от преработка на дървесина. Горивото е със средна влажност около 40% и калоричност 12000 kJ/kg. След пещна камера са разположени тристепенен паропрегревател, економайзер и въздухоподгревател. Въздухът за горене се подава на две нива. Температурата на изходящите димни газове в експлоатационни условия е относително висока, като варира между 160 и 170°С. В изчисленията е приета средна температура 163°С. Стойностите на дебитът и

останалите параметрите на произведената прегрята пара са съобразени с характерните експлоатационните такива. Същото важи и за повечето от останалите параметри на котела като дебит на горивото, коефициент на излишък на въздух и др. Част от тях се явяват входни данни за математичния модел.



Фигура 3.4 Изчислителна схема на математичния модел на котел на биомаса с кипящ слой

- | | |
|---------------------------|------------------------|
| 1 Пещна камера | 9 Паропрегревател |
| 2 Вход въздух | 10 Паропровод |
| 3 Източник на въздух | 11 Въздухоподгревател |
| 4 Източник на подгр. вода | 12 Комин |
| 5 Източник на гориво | 13 Въздушен вентилатор |
| 6 Економайзер | 14 Димен вентилатор |
| 7 Паропрегревател | 15 Ръкавен филтър |
| 8 Паропрегревател | |

С така разработения симулационен модел бяха извършени пресмятания на топлинните и масовите баланси на елементите на инсталацията. Основна цел на математичното моделиране бе получаване на информация за характеристиките на изходящите димни газове – дебит, състав и енталпия. С оглед верификация на математичния модел в таблица 3.2 са представени за

сравнение данни от експлоатационни измервания и стойности за съответните параметри, получени с математичното моделиране.

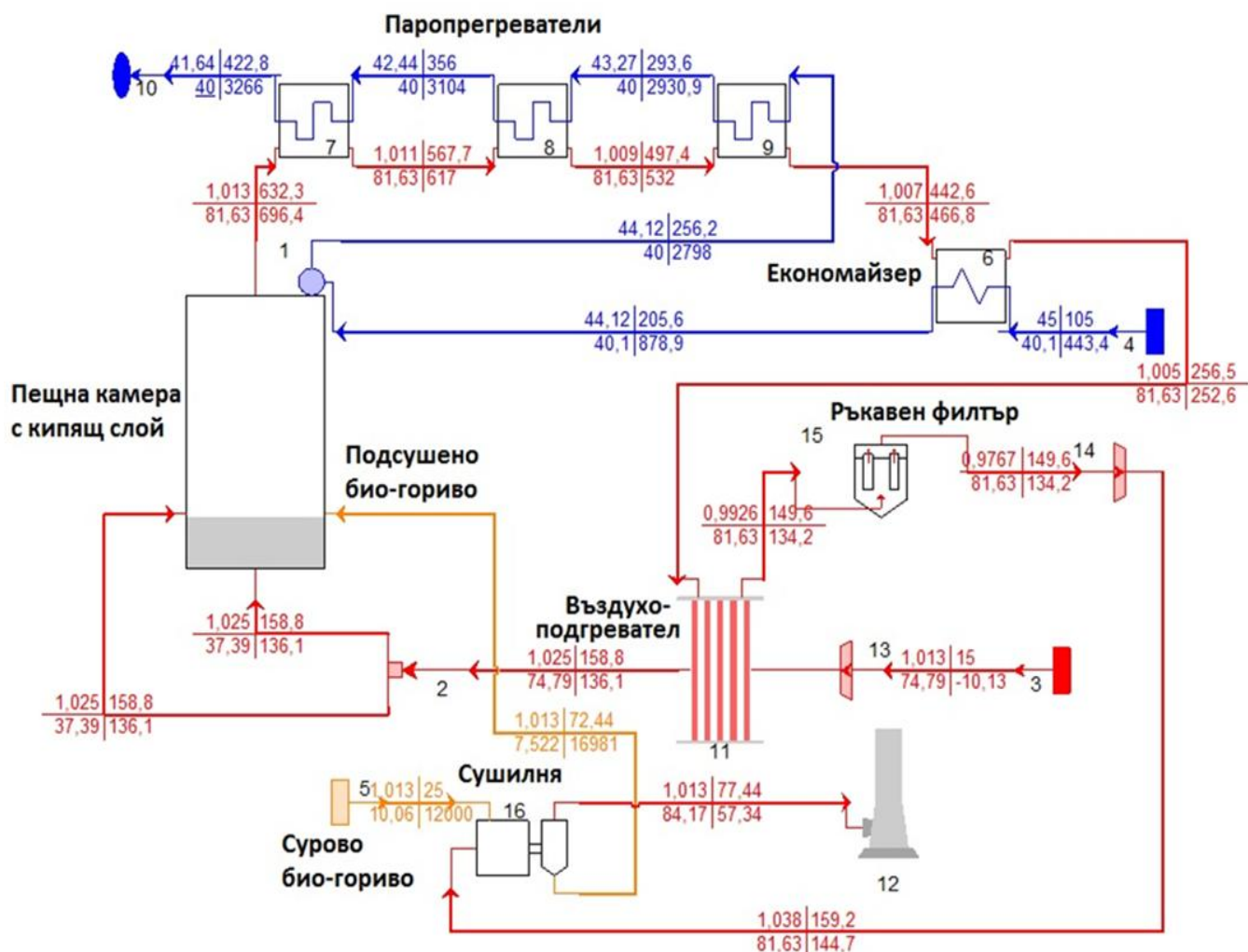
Таблица 3.2 Експлоатационни и изчислени параметри

Параметри	Експлоатационни параметри	Параметри получени с мат. модел
Дебит горивото, t/h	11	11,06
Температура на горивото, °C	25	25
Дебит на въздуха, t/h	80,9	81,25
Дебит подхранваща вода, t/h	40	40,1
Температура подхранваща вода, °C	105	105
Дебит прегрята пара, t/h	40	40
Температура на изходящи ДГ, °C	171,2	170
Дебит на изходящи ДГ, t/h	90,87	91,57

Разликите между измерените и пресметнатите стойности са минимални. Очевидно симулацията с математичния модел е достатъчно коректна и моделът може да се използва за предвидените в изследването анализи.

Предварителното подсушаване на биомасата е процес, който е свързан с интензивно използване на значително количество енергия. В промишлените предприятия топлинната енергия, нужна за предварителното подсушаване на този вид гориво най-често идва от съоръжението, в което тя се подава за изгаряне. Чрез предварителното подсушаване на биогоривото може да се утилизира топлината на изходящите димни газове от парогенератора и да се повиши неговата енергийна ефективност. Математичният модел представен по-горе и касаещ съществуващ котел с кипящ слой бе допълнително развит, с оглед осъществяване на предварително подсушаване на горивото. За тази цел в изчислителната схема бе добавен елемент моделиращ работата на сушилня с димни газове с позиция 16.

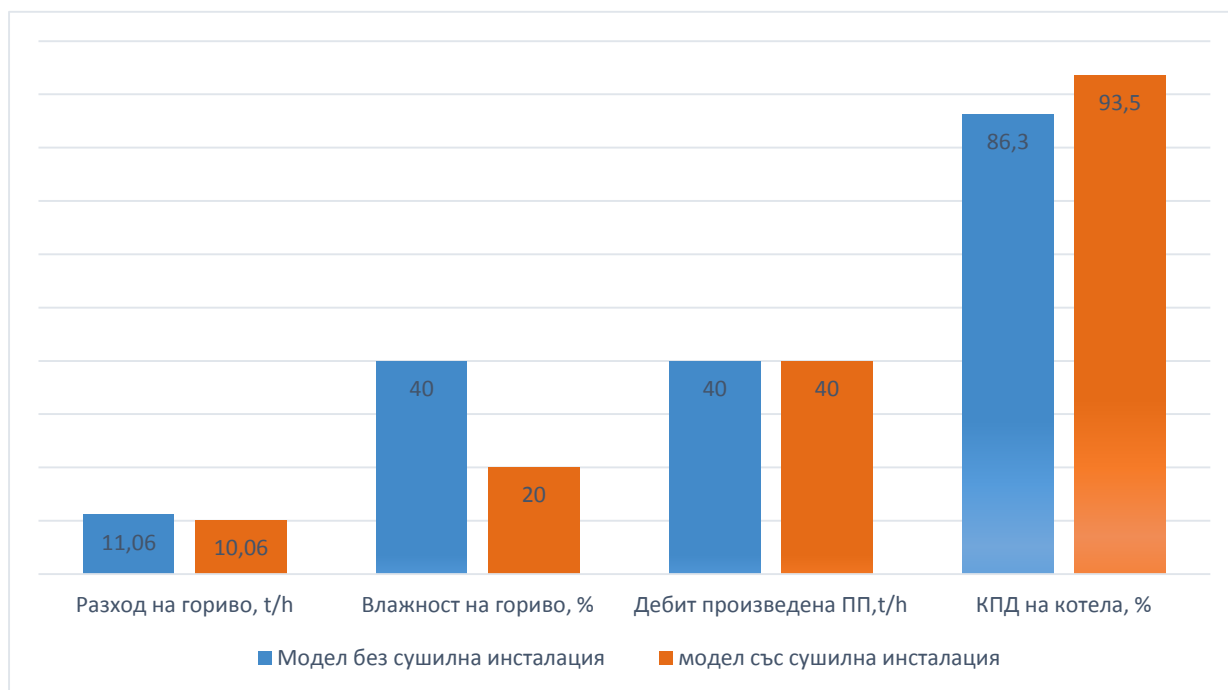
На фиг. 3.6 е представена съответната изчислителната схема, включваща и основните резултати от математичното моделиране на котел изгарящ дървесна биомаса в пещ с кипящ слой с интегрирана сушилна инсталация. Подходящото място за поставяне на сушилната инсталация в схемата на котела е разположено веднага след димния вентилатор 13. Димните газове преди това са преминали през всички нагревни повърхности, отдали са част от топлинната си енергия на пароводното работно тяло и след преминаването им през системата от ръкавни филтри са понижили температурата. След преминаването си през инсталацията за подсушаване тяхната температура вече ще бъде от порядъка на 77 °C и димните газове могат да бъдат отведени към атмосфера с помощта на съществуващото коминно тяло. Сушилната инсталация намалява влажността на горивото от 40% на 20%.



Фигура 3.6 Изчислителна схема на математично моделиране на котел с кипящ слой с предварително подсушаване на горивото

Резултатите от симулацията показват, че при работа с предварително подсушено гориво, паропроизводството на котела може да се запази на номиналното си ниво – 40 t/h. При това се наблюдава известно понижение на температурата на произведената пара – от 440 на 423°C. Причината за това е влошаване на конвективния топлообмен в паропрегревателните нагревни повърхности, поради по-ниските скорости на димните газове. Тяхното понижение пък е в резултат на намаления дебит на димните газове в котела – от 91.6 t/h на 81.6 t/h, което пък от своя страна е в резултат на намаления разход на гориво – от 11 t/h на 10 t/h. Понижението на температурата на свежата пара е минимално и не може да застраши надеждната работа на парната турбина [1].

По - важните резултати получени при сравнителния анализ на двата модела са представени в графичен вид на фигура 3.11.



Фигура 3.11 Сравнителен анализ на основните параметри на пресметнатите конфигурации

Използването на сушилна инсталация за предварително подсушаване на биомасата дава възможност да се спести гориво от порядъка на 1 t/h. С това годишния разход на гориво се намалява с 8160 t (8160 часа годишна използваемост). При средна цена на използвания за инсталацията микс от биомасата от порядъка на 110 лв/t, може да се оцени приходът на годишна база:

$$8160 \text{ t} \cdot 110 \text{ лв/t} = 897\,600 \text{ лв/година}$$

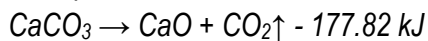
След извършена икономическа оценка на предложения метод, на базата на проучване на пазара за инвестиционни разходи, се установи, че предложената реконструкция с инсталиране на сушилна инсталация на димни газове би довела до откупуване на инвестицията за период около 4 години, което дава възможност да се обоснове рентабилността на реконструкция.

ГЛАВА 4. ПОДОБРЯВАНЕ НА ЕФЕКТИВНОСТТА НА ВАРО-РЕГЕНЕРАТИВНА ПЕЩ (ВРП)

Регенерирането на вар от варна утайка (шлам) има широко приложение във всички хартиено - целулозни предприятия. Регенерацията на вар от утайка, независимо от относително ниската цена на варта, е икономически целесъобразно. Необходимо е да се има предвид, че количеството варова утайка е необичайно високо. Изхвърлянето на такива огромни количества варна утайка е недопустимо поради екологични съображения. Ако заводът няма система за регенериране на варта, се налага същата да бъде отведена на специални площадки, недалече от предприятието, където да се съхранява. При продължителна работа на предприятието се замърсяват големи площи около завода, което е недопустимо поради екологични причини. Ето защо всички действащи хартиено - целулозни заводи са снабдени със системи за регенериране на вар от утайка. Варовите пещи се използват за преобразуване на шлам в регенерирана негасена вар за повторно и използване в процеса на регенерация в заводите за производство на целулоза и хартия. Реакцията на каустизация е утаяване на CaCO_3 , който е отделен от лугата и промит за отделяне на остатъчните алкали. Полученият шлам се подава във въртяща пещ, където се подсушава и подгрява от изгорелите газове от горелка в противоположния край на пещта. При достигане на температура от около 800°C , в зоната на изпичане, шлам се разгражда до CaO и CO_2 . Полученият CaO е негасена вар, която се използва при процеса каустизация.

Регенерирането на варта от карбонатната утайка се извършва в наклонена въртяща се пещ, състояща се от цилиндричен корпус, захранваща глава, разтоварваща глава, основно и спомагателно задвижване. Корпуса на пещта е изработен от заварени един за друг стоманени листове, а отвътре той е облицован с огнеупорни материали. В първите 20 метра от захранващата глава зидарията е огнеупорен бетон, а останалата част е облицована с шамотни и алумо-силикатни тухли. Условно пещта може да се раздели на три зони:

- Зона на изсушаване на карбонатната утайка - в нея се извършва отделяне на влагата от материала.
- Зона на подгряване - в нея се осъществява подготовката на материала за изпичане и началото на термичната дисоциация.
- Зона на изпичане - в нея се извършва ендотермичната реакция на дисоциране на калциевия карбонат до калциев окис и въглероден диоксид.



Целта на реакцията на преобразуването е да се превърне CaCO_3 , получен в процеса на каустизация в CaO , който може да бъде използван повторно. Тази реакция протича чрез нагряване на CaCO_3 , докато настъпи реакция. Влажната вар влиза в пещта при високия край и се транспортират към ниския край. Транспортирането се осъществява чрез въртенето и наклона на пещта. От своя път през пещта, варовия шлам се изпича посредством горещи димни газове, като се движат в противоток. Топлината се доставя от газова горелка намираща се в ниската част на ВРП.

Най-важните проектни параметри на варо-регенеративната пещ са представени в табл. 4.2. От там се вижда, че температурата на изходящите димни газове надвишава 250°C . Очевидно настоящата работа на пещта е съпроводена с изхвърлянето на значителни

количества топлина в атмосферата и е необходимо да се предприемат мерки за подобряване на нейната енергийна ефективност.

Таблица 4.2 Експлоатационни параметри на варовата пещ

Производителност	90 t/d
Разход на гориво – природен газ	1000 nm ³ /h
Температура на въздуха за горене	20°C
Температура на изходящи димни газове	260 °C
Температура на постъпващия шлам	50°C
Температура в зоната за изпичане	1000 – 1200 °C
Сухост на карбонатен шлам	70-75%.
Съдържание на активен СаО в регенерирана вар	84%
Съдържание на СаСО ₃ в регенерирана вар	1-1,8%.

Както бе посочено по-горе, от съществено значение за избора на технологията за преобразуване на отпадната топлина е размерът на инсталацията. С оглед на това е представена оценка на топлинния потенциал на изходящите от пещта димни газове, извършена чрез пресмятане на материален и енергиен баланс на ВРП, обобщен в табличен вид.

Таблица 4.11 Компоненти на енергийния баланс на ВРП

Приходна част:	Q1	64 184,23	kJ/t
	Q2	2 818,23	kJ/t
	Q3	2 589 342,21	kJ/t
	Q4	22 475,72	kJ/t
Общо:	Q	2 678 820,39	kJ/t
Разходна част:	Q5	233 159,16	kJ/t
	Q6	587 029,38	kJ/t
	Q7	46 281,71	kJ/t
	Q8	8 665,03	kJ/t
	Q9	691 590,18	kJ/t
	Q10	767 467,01	kJ/t
	Q11	344 627,93	kJ/t
Общо:	Q	2 678 820,39	kJ/t

За да се оцени топлинния потенциал на изходящите от пещта димни газове е необходимо да се знае техния дебит и енталпия. За пресмятане на енталпията е достатъчно да се знае температурата и специфичния топлинен капацитет на димните газове. Димните газове са смес от няколко компонента. За пресмятане на специфичния топлинен капацитет на газове смеси е нужна следната информация:

- Дяловото участие на всеки отделен компонент;
- Специфичния топлинен капацитет на всеки отделен компонент;

- Температурата на сместа;

Проведените пресмятания на материалните и топлинни баланси на ВРП и по-специално резултатите от тях предоставят нужната информация. При определяне на дебита и дяловото участие на всеки един компонент на димните газове трябва да се вземат предвид не само продуктите на горенето, но и газовете получени от процеса.

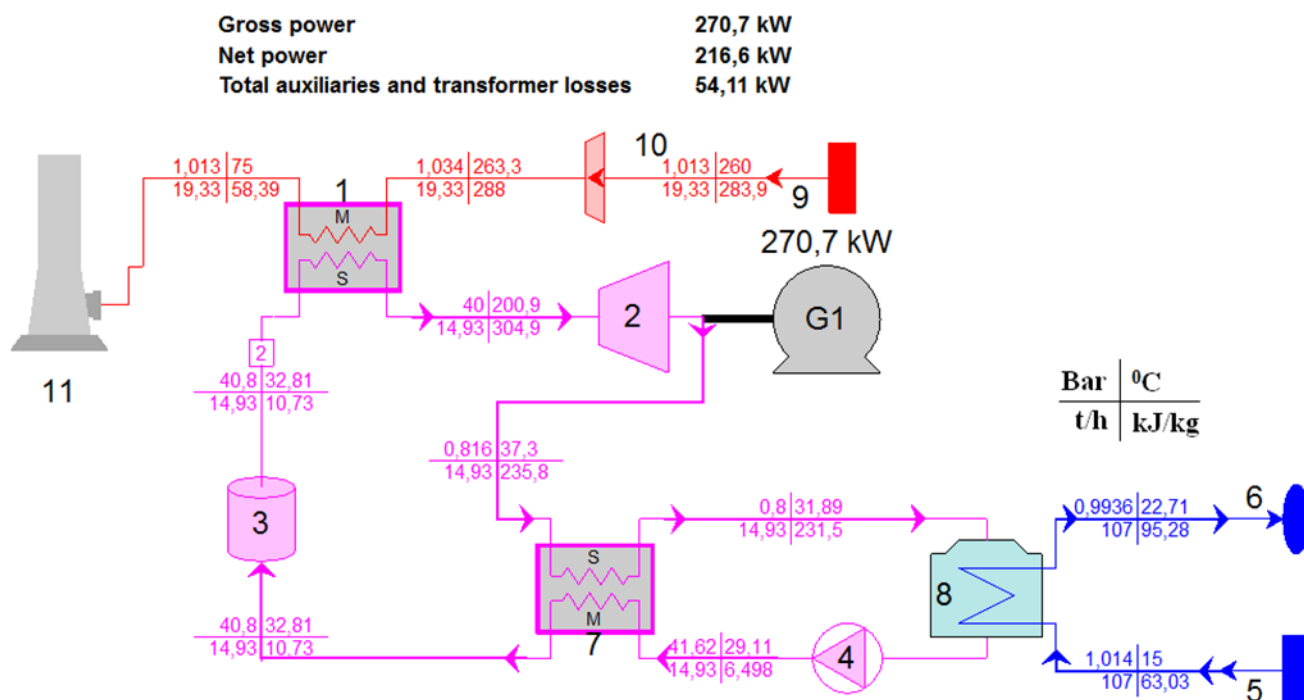
Както бе посочено по-горе температурата на изходящите от ВРП димни газове в експлоатационни условия е сравнително висока - около 260 °C. Изхвърлянето им директно в атмосферата води до загуби на значително количество топлинна енергия. Изхождайки от горепосоченото бе изследвана възможността да се оползотвори отпадната топлина, носена от тези газове чрез допълнителното им охлаждане до 70 – 80 °C. В настоящото изследване се предлага съответната топлинна енергия да се преобразува в ел. енергия чрез прилагането на Органичен цикъл на Ренкин (ОЦР). За облекчаване на пресмятанията бе използван метода на математичното моделиране. С тази цел бе съставен математичен модел на системата от съоръжения формиращи Органичен цикъл на Ренкин.

В симулационната среда на Thermoflex, бяха проведени изследвания с три различни хладилни агента респ. pentane, R-123 и R 141b. Изборът на всеки един от тези работни флуиди се основава на очакването, че при неговото използване в качеството му на работно тяло в ОЦР, получаваната ел. мощност ще бъде по-голяма от тази при другите флуиди.

Изчислителна схема на системата от съоръжения, формиращи Органичния цикъл на Ренкин с работен флуид R 141b, е показана на фиг. 4.7. Предаването на топлината на димните газове към работното тяло на ОЦР става в изпарителя 1. Димните газове отдават част от своята топлинна енергия, подгрявайки и изпарявайки флуид с ниска температура на кипене. След това се отвеждат с помощта на димния вентилатор 10 към атмосферата през комина 11.

Изпареният флуид от своя страна преминава през турбината 2. В нея неговата топлинна енергия се преобразува в механична работа с цел задвижване на електрически генератор G1. След преминаването си през турбината флуида постъпва в регенеративния топлообменник 7. Използването на регенеративен топлообменник дава възможност да се „свали прегрева“ и да се намали температурата на работното тяло преди постъпването му в кондензатора. По този начин се намаляват поне частично неизбежните загуби в кондензатора. След това работният флуид отново претърпява фазов преход, постъпвайки в кондензатора 7, където отдава топлината си на охлаждащата вода. Получената течност с помощта на подхранващата помпа 4 се връща в изпарителя за повторно изпарение. Преди това флуида преминава през регенеративния топлообменник, където към него се предава част от топлината на отработилите пари след турбината .

В изследването за температурата на охлаждащата вода за кондензатора бе приета стойност равняваща се на средногодишната стойност на температурата на водата от водоизточника ползван в целулозния завод. Температурните напори в топлообменниците са съобразени с тези, приемани в обичайната инженерна практика. В изчислителната схема на фиг. 4.7 са показани и резултати от пресмятанията на топлинните и енергийни баланси в инсталацията, респ. резултатите от симулационното моделиране.



Фигура 4.7 Изчислителна схема на инсталация за утилизация на отпадна топлина от ВРП с ОЦР - работен флуид R 141b

- | | |
|--|----------------------------------|
| 1. Изпарител (парогенератор); | 6. Изход на охлаждащата вода; |
| 2. Турбина; | 7. Регенеративен топлообменник; |
| 3. Резервоар за работното тяло R 141b; | 8. Кондензатор; |
| 4. Подхранваща помпа; | 9. Изход на димни газове от ВРП; |
| 5. Вход на охлаждаща вода за кондензатора; | 10. Димен вентилатор |

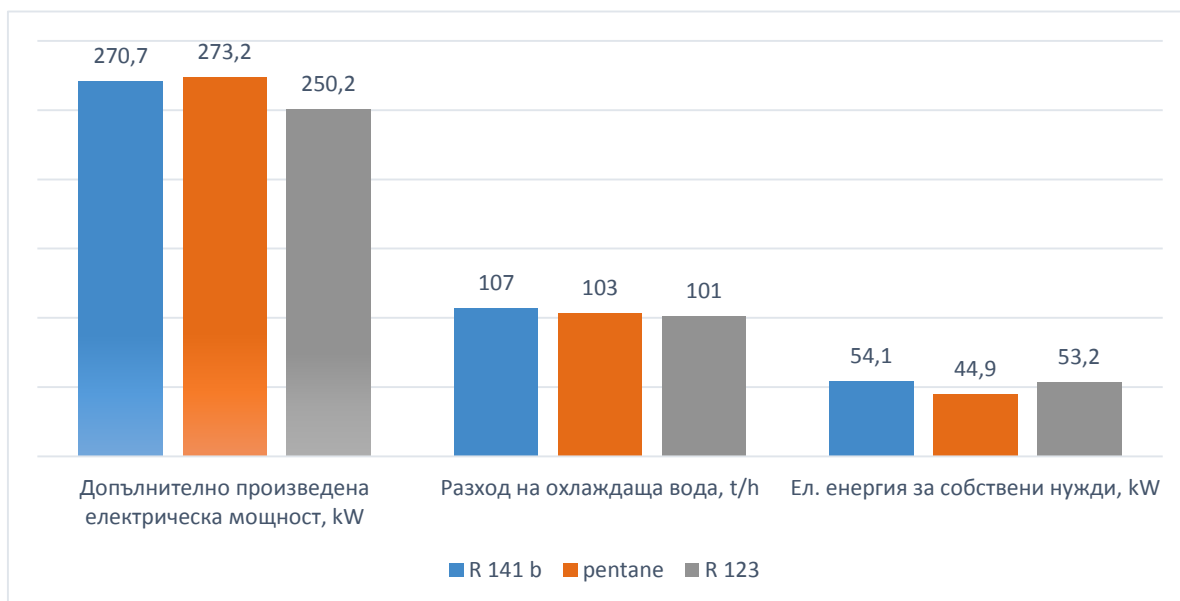
Както се вижда от схемата произвежданата електрическа мощност от генератора (Gross power) е 270,7 kW. С използваният софтуер е възможно да се пресмята и ел. мощност за собствени нужди, респ. за задвижване на подхранващата помпа и димния вентилатор (Total auxiliaries ...). В случая, тя е в размер на 54,11 kW, от което следва, че нетната произвеждана ел. мощност (Net power) е 216,6 kW.

От топлинния баланс на изпарителя се отчита, че обменената в него топлинна енергия е 1233 kW. Отношението между топлинната мощност предадена от димните газове на работното тяло и нетната произвеждана ел. мощност дава нетния електрически КПД на инсталацията, респ. 17,57%. Получената стойност е сравнително ниска. Този резултат е предопределен от ниските параметри на работното тяло пред турбината: налягане 40 Bar и температура 200,9 °C. Техните стойности са така подбрани, че от една страна да са максимално високи и от друга произвежданите пари да са в сухо наситено състояние.

За изпарителя бе зададено димните газове да се охлаждат в него до 75°C. Тази температура е минимално възможната с оглед избягването с известен резерв на възникване на съществена кондензация на водните пари съдържащи се в димните газове. Оросяването на димните газове може да предизвика развитието на корозионни процеси в дымоходите и е наложително да се избягва.

Кратко обобщение на получените резултати в графичен вид от проведените изследвания е представено на фиг. 4.11. Налага се изводът, че прилагането на трите флуида води до близки или сходни параметри на съответните инсталации, като за работния флуид R 141b се

получават най-добри резултати. С това се потвърждават изводите на други изследователи, че за разглеждания топлоизточник имащ температура 260 °C най-подходящ работен флуид е R 141b.



Фигура 4.11 Сравнителен анализ на резултатите от симулационните пресмятания в графичен вид

Трите пресметнати и представени по-горе варианти имат почти еднаква ефективност, но при варианта с използване на Pentane получената мощност на генератора е най-голяма. В следващата кратка икономическа оценка на предложението за усъвършенстване на работата на ВРП чрез прилагане на ОЦР се разглежда именно този вариант.

Използването ОЦР дава възможност да се произведе допълнителна ел. мощност от порядъка на 273 kW. С това годишното ел. производство на ТЕЦ в целулозния завод може да се увеличи с близо 2 228 MWh (при 8160 часа годишна използваемост):

$$(8160 \cdot 270)/1000 = 2\,227,68 \text{ MWh.}$$

При преференциалната цена на електрическата енергия на предприятието за текущия регулаторен период от 149,49 лв/ MWh, приходите от продажба на ел. енергия на годишна база, ще се равняват на :

$$2\,227,68 \cdot 149,49 = 333\,016 \text{ лв/година;}$$

В публикацията [77] се посочва, че инвестиционните разходи за изграждане на ОЦР инсталация с мощност от порядъка 500 kW са 2700 €/kW. Съответно размерът на нужната инвестиция за изграждане на инсталация с ОЦР към варовата пещ ще се равнява на: $273 \cdot 2700 = 737\,100 \text{ €}$ или 1 437 345 лв.

В крайна сметка, при извършена икономическа оценка, на базата на утвърдена цена за електрическа енергия и проучване на пазара за инвестиционни разходи за изграждане на инсталации с ОЦР, се установява, че откупването на инвестицията на изграждане на инсталация с ОЦР към варовата пещ ще се извърши за период от около 4,3 г.

ИЗВОДИ

След извършване на анализ на енергийната ефективност на производството в предприятие за целулоза и хартия и проведените изследвания върху различни методи за утилизация на отпадна топлина в него, могат да бъдат направени следните изводи:

- Констатирано бе, че експлоатацията на три от основните съоръжения в завод за производство на целулоза и хартия - Содорегенерационен котелен агрегат (СРК), Котел на биомаса с „кипящ“ слой и Варорегенеративна пещ (ВРП), е съпътствана с отделянето на значителни количества отпадна топлина, която под формата на горещи димни газове се изхвърля в околната среда. Утилизирането на ниско-потенциалната отпадна топлина от посочените съоръжения, свързани с производството на целулоза и хартия, биха спомогнало съществено да се повиши енергийната ефективност на съоръженията и на производствения процес като цяло.
- Производството на целулоза и хартия е един изключително сложен и енергоемък процес, който съществува от древността и до наши дни е претърпял множество подобрения. Въпреки това, след направеното проучване не са открити достатъчно добри практики за утилизация на отпадна топлина от производството на целулоза и хартия като средство за подобряване на ефективността на цялостния технологичен процес.
- Съставени бяха подробни материални и топлинни баланси на СРК и ВРП, с цел получаване на количествена оценка на основните характеристики на изходящите газови потоци. С методите на математичното моделиране бяха съставени модели на съществуващите съоръжения. Резултатите от симулационните пресмятания бяха сравнени с реални експлоатационни параметри, с цел валидиране на моделите. Установи се, че пресмятанията с математичните модели са достатъчно представителни и могат да се използва за предвидените в дисертационния труд анализи
- Синтезирани бяха предложения за утилизация на отпадна топлина от горещи димни газове на Содорегенерационен котелен агрегат (СРК), Котел на биомаса с „кипящ“ слой и Варорегенеративна пещ (ВРП), както следва:
 - Предложено бе усъвършенстване на енергийната ефективност на СРК чрез замяна на парните калорифери за подгряване на въздуха за горене с въздухоподгревател. С методите на математичното моделиране бяха оценени ефектите от евентуалната реконструкция. Установено бе, че ако се инсталира на въздухоподгревател, то това ще намали съществено разхода на пара за собствени нужди. Освободеното количество пара може да се пропусне през парната турбина и така да се произвежда около 900 kW допълнителна електрическа мощност в ТЕЦ. Това ще увеличи съществено приходите на предприятието от продажбата на електроенергия. Съответният срок за изкупуване на нужната инвестиция е 2,8 г;
 - Извършената изчислителната оценка на потенциала на изходящите от СРК димни газове, предостави възможност да се оцени тяхното използване и за директно производство на ел. енергия с Органичен Цикъл на Ренкин. Изготвен бе математичен модел на СРК с включен ОЦР. След направено проучване за най-подходящите работни флуиди при дадените параметри на ДГ, бяха извършени изследвания с пет различни

флуида. Най-добри и сравнително близки резултати се получиха при три от използваните работни флуида. Използването на пентан, дава възможност да се произвежда на около 1300 kW допълнителна електрическа мощност в ТЕЦ, без да се увеличава разхода на гориво. Това ще увеличи съществено приходите на предприятието от продажбата на електроенергия. Съответният срок за изкупуване на нужната инвестиция е около 3,2 г.;

- Предложението за оптимизация на работата на котел с „кипящ“ слой на биомаса чрез предварителното подсушаване на биогоривото с интегрирана сушилна инсталация, може да доведе до значително подобряване на топлинната икономичност на котела и на ТЕЦ като цяло, както и до намаляване на вредните емисии на киловатчас произведена електроенергия. Проведеният в представеното изследване анализ показва, че за целта може да се използва топлината на изходящите димни газове, при което ще се намали влажността на биогоривото за котела със средно 50%. Предварителното подсушаване води до значително увеличаване на енергийната ефективност, като КПД на котела нараства от 86% на 93%, а разходът на гориво намалява с 10%. След извършена икономическа оценка на предложения метод, на базата на проучване на пазара за инвестиционни разходи, се установи, че предложената реконструкция с инсталиране на сушилна инсталация на димни газове би довела до откупуване на инвестицията за период около 4 години, което дава възможност да се обоснове рентабилността на реконструкция.
- За утилизация на отпадната топлина от Варо-регенеративна пещ бе предложена схема за използване на отпадната топлина, чрез преобразуването ѝ в електрическа енергия с Органичен цикъл на Ренкин. Изготвен бе математичен модел на инсталацията с ОЦР с източник на димни газове ВРП. След направено проучване за най-подходящите работни флуиди при дадените параметри на ДГ, бяха извършени изследвания с три различни флуида. Пресметнатите и представени варианти имат почти еднаква ефективност, но при варианта с използване на пентан се получиха най-високи резултати, респ. създава се възможност за производство на около 270 kW електрическа мощност. При извършена икономическа оценка, на базата на утвърдена цена за електрическа енергия и проучване на пазара за инвестиционни разходи за изграждане на инсталации с ОЦР, се установява, че откупуването на инвестицията на изграждане на инсталация с ОЦР към варовата пещ ще се извърши за период от около 4,3 г.

- След обобщен анализ върху направените изследвания и получените резултати, може да се заключи, че поставените в дисертационния труд задачи, са изпълнени успешно.

НАУЧНО-ПРИЛОЖНИ И ПРИЛОЖНИ ПРИНОСИ

- Проведени са изследвания относно реконструкцията на съществуващ Содорегенерационен котелен агрегат с инсталиране на въздухоподгревател, използващ изходящи димни газове за подгряване на въздуха за горене. Инсталирането на въздухоподгревател позволява да се произведе значително количество електроенергия в ТЕЦ, без да се увеличава употребяваното гориво. Доказана е приложимостта на предложения метод за утилизация на отпадна топлина и неговата икономическа целесъобразност.
- Проведени са изследвания, анализиращи ефектите от изграждане на инсталация за утилизация на отпадна топлина от изходящи димни газове на Содорегенерационен котелен агрегат, с цел допълнително производство на ел. енергия с Органичен цикъл на Ренкин. Предложения метод е уникален за сулфатната технология за производство на целулоза и позволява да се генерира значително количество електроенергия в ТЕЦ, без да се увеличава употребяваното гориво. Доказана е приложимостта на предложения метод и неговата икономическа целесъобразност.
- Установена е приложимост и икономическа целесъобразност на предложения метод за утилизация на отпадна топлина от горещи димни газове на котел на биомаса с „кипящ“ слой чрез изграждане на сушилна инсталация за предварително подсушаване на биомасата.
- Проведени са изследвания върху изграждане на инсталация за утилизация на отпадна топлина от горещи димни газове на Варо-регенеративна пещ, използвана в производството на целулоза и хартия, чрез допълнително електропроизводство с Органичен цикъл на Ренкин. Подобни изследвания има извършвани само върху циментови пещи, които работят на сходен принцип. Доказана е приложимостта на предложия метод и неговата икономическа целесъобразност

СПИСЪК НА ПУБЛИКАЦИИТЕ ПО ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

1. **Колева Д. Попов Д., „Предварителен анализ и избор на сушилна технология за подсушаване на горивото за енергиен котел на биомаса“**– изнесен доклад на XX научна конференция с международно участие ЕМФ 2015 г, Том I, страници от 180 до 186.
2. **Колева Д. Попов Д., “Технологични решения за подобряване на енергийната ефективност на варовите пещи в целулозно-хартиената промишленост”** – изнесен доклад на XXI научна конференция с международно участие ЕМФ 2016 г, Том I, страници от 67 до 73.
3. **Колева Д. Попов Д., „Рационализиране на подгръването на въздуха за горене в мощен содорегенерационен котелен агрегат“** – изнесен доклад на XXII научна конференция с международно участие ЕМФ 2017 г, Том I, страници от 17 до 23 .
4. **Колева Д. Попов Д., „Иновативно преобразуване на отпадна ниско-потенциална топлина в електроенергия“**– Списание Енергетика брой 6 Ноември/ Декември 2017 г., страници от 42 до 49.
5. **Колева Д. Попов Д., „Сравнителен анализ на възможни методи за утилизация на отпадна топлина от димни газове на Содорегенерационен котелен агрегат“** – изнесен доклад на Международен Енергиен форум 2018 г, страници от 67 до 72.
6. **Колева Д., „Подобряване на енергийната ефективност на котел на биомаса чрез предварително подсушаване на горивото“** - Списание Енергетика, брой 4 Юли/ Август 2018 г., страници от 16 до 24.
7. **Колева Д. Попов Д., “Усъвършенстване на топлоенергийни съоръжения и системи при производството на целулоза и хартия”** – изнесен доклад на XXIII научна конференция с международно участие ЕМФ 2018г, Том I, страници от 8 до 14.

SUMMARY

PhD thesis title : Improvement of facilities and systems in industrial thermal power plants

PhD Student: M.Sci.Eng. Dilyana Koleva

Energy saving in households and industry is always an important task for a relatively weak in terms of energy resources country, such as Bulgaria. It also leads to the improvement of environmental parameters, as it is accompanied by a reduction of the emissions from the burning of fuels. Large part of the technological processes in different branches of industry is accompanied by releasing of waste gases, air, steam, etc., whose high temperature allows them to be used as an energy carrier in other processes. The aim of the dissertation is to analyze the efficiency of one of the oldest and most energy intensive processes - the production of pulp and paper in actual plant. The operation of multiple production facilities and systems in the pulp and paper industry is accompanied by the release of a large amount of low-potential waste heat, which is very often not utilized. Waste heat from production processes can be utilized in two main ways - to generate heat by heating different flow streams or converting output heat into electricity. After the analysis, we will summarize the main sources of waste heat in existing pulp and paper production. On the basis of these analyzes and studies, a correct approach will be set for the use of this waste heat with the methods of mathematical modeling.

The mathematical modeling method evaluates the effect of the heat utilization of flue gas from the largest sources of waste heat in the pulp and paper industry. The results of the study show that the heat and electricity produced is in quantity to ensure the good profitability of a project to build the respective installation. The expected result is the achievement of a significant increase in the energy efficiency of the production. It should also be noted the environmental effect of reducing the consumption of natural resources coupled with cost-effective technology to limit greenhouse gas emissions.