



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOO
INSENERITEADUSKOND
Virumaa kolledž

**Põlevkivi poolkoksigaasil töötava gaasiturbiini
tehnoloogia juurutamine elektri tootmise efektiivsuse
tõstmiseks auru-gaasi tsüklis**

**Implementation of oil shale semi-coke gas-fired turbine
technology to increase the efficiency of electricity generation in
the steam-gas cycle**

KEEMIATEHNOLOOGIA ÕPPEKAVA LÕPUTÖÖ

Üliõpilane: Nikita Zapevalov

Üliõpilaskood: 193079 EDKR

Juhendaja: Diana Berseneva, MSc

AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

Lõputöö alusel ei ole varem kutse- või teaduskraadi või inseneridiplomit taotletud. Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on viidatud.

"22" mai 2023.

Autor: Nikita Zapevalov

/ allkiri /

Töö vastab rakenduskõrgharidusõppe lõputööle/magistritööle esitatud nõuetele "22" mai 2023.

Juhendaja: Diana Berseneva

/ allkiri /

Kaitsmiskomisjoni esimees: Antonina Zguro

/ allkiri /

LIHTLITSENTS LÕPUTÖÖ ÜLDSUSELE KÄTTESAADAVAKS TEGEMISEKS JA REPRODUTSEERIMISEKS

Mina Nikita Zapevalov (sünnikuupäev: 23.02.2000)

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose

Põlevkivi poolkoksigaasil töötava gaasiturbiini tehnoloogia juurutamine elektri tootmise efektiivsuse tõstmiseks auru-gaasi tsükli mille juhendaja on Diana Berseneva,

1.1. reprodutseerimiseks säilitamise ja elektroonilise avaldamise eesmärgil, sealhulgas Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogusse lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

1.2. üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tallinna Tehnikaülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogu kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.

2. Olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.

3. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta kolmandate isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest ja teistest õigusaktidest tulenevaid õigusi.

TalTech Inseneriteaduskond Virumaa kolledž

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Üliõpilane: Nikita Zapevalov, 193079 EDKR

Õppekava, peeriala: EDKR16/17 Keemiatehnoloogia

Juhendaja(d): Doktorant-nooremteadur, Diana Berseneva, diana.berseneva@taltech.ee

Konsultant: Konstantin Bersenev, tehniline direktor

ENTEH Engineering AS, +372 5217988, konstantin@enteh.ee

Lõputöö teema:

Põlevkivi poolkoksigaasil töötava gaasiturbiini tehnoloogia juurutamine elektri tootmise efektiivsuse tõstmiseks auru-gaasi tsüklis.

Implementation of oil shale semi-coke gas-fired turbine technology to increase the efficiency of electricity generation in the steam-gas cycle.

Lõputöö põhieesmärgid:

Gaasiturbiini uurimine ja arvutamine

Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Ettevõtte põlevkivi töötlemisgaaside tootmistehnoloogia kirjeldus	06.03.2023
2.	Olemasolevate põlevkivi töötlemisgaaside põletamisel töötavate elektri- ja soojusenergia tööstustsüklite ülevaade. Põlevkivi töötlemisgaaside omaduste kirjeldus	10.03.2023
3.	Gaasiturbiiniseadmete abil töötavate elektri- ja soojusenergia kombineeritud tootmistsüklite ülevaade. Põlevkivi töötlemisgaaside kasutamise võimaluse analüüs gaasiturbiinides	22.03.2023
4.	Arvususlik osa	10.04.2023
5.	Lõputöö vormistamine	12.05.2023

Töö keel: Eesti keel

Lõputöö esitamise tähtaeg: "22" mai 2023a

Üliõpilane: Nikita Zapevalov

"22" mai 2023a

/allkiri/

Juhendaja: Diana Berseneva

"22" mai 2023a

/allkiri/

Konsultant: Konstantin Bersenev

"22" mai 2023a

/allkiri/

Programmijuht: Antonina Zguro

"22" mai 2023a

/allkiri/

SISUKORD

EESSÕNA	8
SISSEJUHATUS.....	9
1. ELEKTRI- JA SOOJUSENERGIA TOOTMISE TEOREETILISED ALUSED	10
1.2 Termodünaamilised tsüklid	11
1.2.1 Carnot' tsükkel.....	11
1.2.2 Rankine'i tsükkel	12
1.2.3 Braytoni tsükkel	13
1.3 Auruturbiiniseaded	14
1.3.1 Auruturbiiniseadmete ja auruturbiinide tüüpide põhimõtteline skeem	14
1.4 Gaasiturbiinid	15
1.4.1 Gaasiturbiiniseadme põhimõtteline skeem	15
1.4.2 Gaasiturbiinide tüübid	17
1.4.2.1 Avatud tsükliga gaasiturbiin	17
1.4.2.2 Suletud tsükliga gaasiturbiin	18
1.5 Elektritootmise kombineeritud tsüklid kombineeritud aurugaasi seadmete abil	18
2. OLEMASOLEVA ELEKTRI- JA SOOJUSENERGIA TOOTMISE TEHNOLOOGIA KIRJELDUS	20
2.1 Poolkoksigaas gaasiturbiiniseadmete kütusena	20
2.1.1 Poolkoksigaasi tootmine	20
2.1.2 Poolkoksigaasi füüsikalised ja keemilised omadused	22
2.1.3 Olemasoleva elektri- ja soojusenergia tootmise tehnoloogia kirjeldus VKG Energia näitel	23
3. ARVUTUSLIK OSA	25
3.1 Soojusskeemide väljatöötamine ettevõtte VKG ENERGIA OÜ jaoks	25
3.2 Perspektiivse gaasiturbiinide mudeli valik poolkoksigaasi põletamiseks	26
3.3 Soojusvaheti arvutamine poolkoksigaasi ettevalmistamiseks gaasiturbiini suunamiseks	28
3.4 Gaasikompressori arvutus tagamaks vajalikku rõhku gaasiturbiini suunamiseks ..	34

3.5 Elektriyaamade moderniseerimise otstarbekuse majanduslikud hinnangud, võttes arvesse efektiivsuse (kasutegur) suurendamise saavutatavat taset.	36
KOKKUVÕTE	38
SUMMARY	39
KASUTATUD KIRJANDUS.....	40
LISAD	44

EESSÕNA

Oma lõputöö teema valisin koos ENTEH Engineering AS-i tehnilise direktori Konstantin Berseneviga. Tutvumispraktika ja Töökeskkonnapraktika toimus autoril samas ettevõttes.

Andmed lõputöö jaoks sai autor ettevõtte ENTEH Engineering AS-i andmebaasist Konstantin Bersenevilt, kellega autor pidas nõu, kui töö kirjutamisel tekkisid arusaamatud momendid. Lõputöö teema on seotud juhendaja Diana Berseneva õpingutega doktorantuuris ja seepärast tunneb ta ka ise selle teema vastu huvi.

Lõputöö autor soovib tänada Diana Bersenevat ja Konstantin Bersenevi, kes aitasid lõputöö kirjutamise ajal, vastates arusaamatutele küsimustele ja hoidsid autoriga ühendust kogu töö kirjutamise aja jooksul. Lisaks neile tänan lektorit Ingrid Preesi, kelle kursusel „Akadeemiline kirjutamine eesti keeles“ sain esmase teabe diplomitöö dokumentide nõuetekohase täitmise ja oluliste kuupäevade kohta ning motivatsiooni töö kirjutamiseks.

Võtmesõnad: poolkoksigaas, põlevkivi, elektri- ja soojusenergia, auruturbiini seadmed, gaasiturbiinid, kombineeritud tsükliga taimed, diplomitöö.

SISSEJUHATUS

Põlevkivi peetakse peamiseks maavaraks, mida kasutatakse toorainena sellistes tööstusettevõtetes nagu Viru Keemia Grupp (VKG), Enefit Power AS, Kiviõli Keemiatööstus (KKT). Põlevkivi termilise töötlemise tehnoloogiate peamine eesmärk on toota tooteid vedelate põlevkiviõlide kujul. Pürolüüsi käigus tekkivad põlevkivi töötlemise põlevgaasid on kõrvalsaadus ja neid kasutatakse kütusena. Üks neist gaasidest on kõrge kütteväärtusega poolkoksigaas.

Praegu suunatakse poolkoksigaasi elektrijaama, kus see põletatakse aurukateldes elektri- ja soojusenergia saamiseks. Elektrienergia tootmiseks ainult aurukatlad kasutavate elektrijaamade kasutegur jääb vahemikku 26-44%. Elektritootmise efektiivsuse tõstmiseks tehakse lõputöös ettepanek võtta kasutusele kombineeritud tsükkel, kus kasutatakse poolkoksigaasil töötavat gaasiturbiini koos olemasoleva auruturbiiniga. Sellise skeemi puhul võib elektritootmise kasutegur ulatuda 38-61%-ni.

Käesoleva töö eesmärk on näidata kombineeritud tsükli kasutamise võimalust elektri- ja soojusenergia tootmiseks poolkoksigaasi abil. Lisaks põhimõttelisele tehnoloogilisele skeemile on töös toodud ka vajalike tehnoloogiliste seadmete arvutused.

Arvestus ei sisalda gaasi- ja auruturbiinide kasuteguri arvutamist, kuna igal sellisel turbiinil on erinevad parameetrid, mis leitakse sõltuvalt tootja spetsifikatsioonist.

Töö koosneb kolmest peatükist. Esimeses on toodud elektri- ja soojusenergia tootmise teoreetilised alused. Teises peatükis on kirjeldatud VKG ENERGIA põlevkivi töötlemise meetodit, poolkoksigaasi saamist ja gaasi kasutamist energeetilisel eesmärgil. Kolmandas peatükis on esitatud aurugaasi seadme tehnoloogiline skeem, arvatud vajalikud seadmed ning hinnatud elektri- ja soojusenergia tootmise kaasajastamise otstarbekus.

1. ELEKTRI- JA SOOJUSENERGIA TOOTMISE TEOREETILISED ALUSED

Kaasaegsed elektri- ja soojusenergia tootmise tehnoloogiad põhinevad termodünaamilistel tsüklitel, mis kujutavad endast suletud süsteemi, milles protsesside käigus tekib töö, mida saab muundada elektri- või soojusenergiaks.

Termodünaamiline tsükkel on suletud süsteem, mis läbib temperatuuri, rõhu ja mahu mõjul mitmesuguseid muutusi, mille juures alg- ja lõppseisund on võrdsed.[6]

Suletud tsükkel võimaldab tagada pidevat kolvide liikumise protsessi, mida täheldatakse soojusmootorites, ja töövedeliku paisumist / kokkutõmbumist, näiteks külmikutes [6].

Termodünaamiliste tsüklite hulka kuuluvad:

- Carnot' tsükkel;
- Rankine'i tsükkel;
- Braytoni tsükkel.

19. sajandi alguses hakkasid tööstuses ja transpordis üha olulisemat rolli mängima aurumasinad. Süstemaatilist teooriate kogumit soojusenergia muundamiseks liikumapanevaks jõuks aurumasinate abil ei olnud aga veel välja töötatud. Prantsuse sõjaväeinsener Nicolas Léonard Sadi Carnot (1796–1832) avaldas 1824. aastal teose "Arutlused tule liikumapanevast jõust". Raamatus pakkus autor välja üldistatud soojusmootorite teooriat, aga ka soojusmootori termodünaamilise süsteemi idealiseeritud mudeli, mida nüüd tuntakse Carnot' tsükliks. Carnot töötas välja termodünaamika teise seaduse aluse ja teda nimetatakse sageli "termodünaamika isaks". [23]

Rankine'i tsükkel või Rankine'i aurutsükkel on protsess, mida kasutatakse laialdaselt elektrijaamades, nagu kivisöel töötavad elektrijaamad või tuumareaktorid. See mehhanism kasutab kütust, et toota katlas soojust, muutes vee auruks, mis seejärel paisub läbi turbiini, tekitades kasulikku tööd. Selle protsessi töötas välja 1859. aastal Šoti insener William J. M. Rankine. See on termodünaamiline tsükkel, mille käigus soojus muundatakse mehaaniliseks energiaks, mis tavaliselt muundatakse elektrienergia tootmisel elektrienergiaks. [24]

Esimene gaasiturbiin, kus realiseeriti Brightoni tsükli (juhuslikult, sest see oli loodud enne Braytoni tsükli), oli John Barberi gaasiturbiin, mis patenteeriti 1791. aastal. Masina idee seisnes selles, et ühes kambris suruda kokku atmosfääriõhk ja teise kambrisse suunata kütust ning mõlemad kambrid on ühendatud põlemisanumaga. Kui õhk seguneb kütusega ja reageerib, kasutatakse põlemisenergiat turbiini pöörlemiseks,

et teha kasulikku tööd. Kuna aga veel 18. sajandi lõpul puudusid tehnoloogilised edusammud jms, ei olnud gaasiturbiinil piisavalt energiat, et suruda gaasid kokku ja teha samal ajal kasulikku tööd, mistõttu seda ei kasutatud. George Brayton oli insener, kes projekteeris esimese pidevsüütega kahetaktilise sise põlemismootori, mida müüdi "Brayton's Ready Motors" nime all. Projekteerimisel kasutati termodünaamilisi protsesse, mida praegu peetakse Braytoni tsükliks, kuid mida nimetatakse ka Joule'i tsükliks. Gaasiturbiin patenteeriti 1872. aastal. Konstruktsioon kujutas endast mootorit, mis oli ühendatud surutud atmosfääriõhu ja gaasi reservuaariga, mis aktiveerus ainult klappi keeramisel. See vabastab rõhu all oleva gaasi põlemiskambris, mis pöörab kolvid, et luua mehaaniline töö ja gaas reservuaaris uuesti kokku suruda. [7]

Termodünaamilisi tsükleid iseloomustavad kahte tüüpi diagrammid – rõhk-entalpia (ph) ja temperatuur-entroopia (Ts). Need diagrammid näitavad kõverate kogumit, mis kirjeldavad aine muutusi termodünaamilises protsessis süsteemis.

Termodünaamilisi tsükleid realiseeritakse auruturbiini- ja gaasiturbiiniseadmetel. Järgnevalt käsitletakse termodünaamilisi tsükleid, iseloomustatakse auru- ja gaasiturbiine ning antakse põhiteavet seadmete põhimõtteliste tehnoloogiliste skeemide ja turbiinitüüpide kohta.

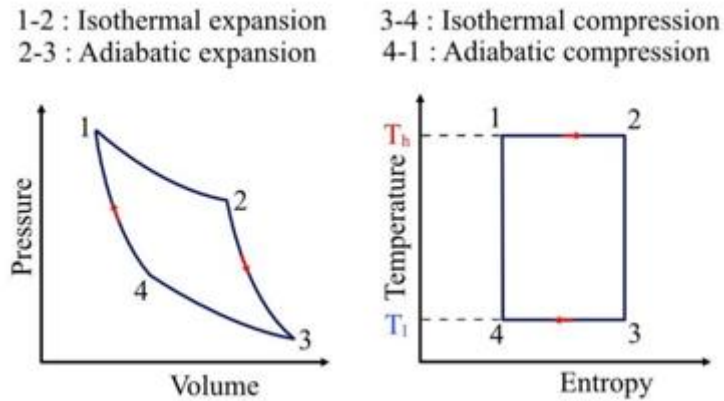
1.2 Termodünaamilised tsüklid

1.2.1 Carnot' tsükkel

Carnot' tsükkel on protsess, mis koosneb kahest isotermilisest ja kahest adiabaatilisest muundumisest. Iga muundumisest on ideaalse gaasi paisumine või kokkutõmbumine. [9]

Carnot' tsükkel koosneb neljast etapist:

- isotermiline paisumine: süsteem on kontaktis soojusmahutiga temperatuuril (T_h), mis võimaldab tal soojust isotermiliselt neelata ja paisumise kaudu tööd teostada. Kuna protsess on isotermiline, ei muuda see süsteemi siseenergiat;
- adiabaatiline paisumine: süsteem on keskkonnast termiliselt isoleeritud ja võib töö teostamisel paisuda. Paisumine põhjustab temperatuuri langemise T_h -st T_l -ni;
- isotermiline kokkusurumine: süsteem on termilises kontaktis radiaatoriga temperatuuril T_l , mis võimaldab kokkusurumisel soojust isotermiliselt ära juhtida;
- adiabaatiline kokkusurumine: süsteem on termiliselt isoleeritud keskkonnast ja seda surutakse kokku, mis tõstab selle temperatuuri T_h -ni. [9]

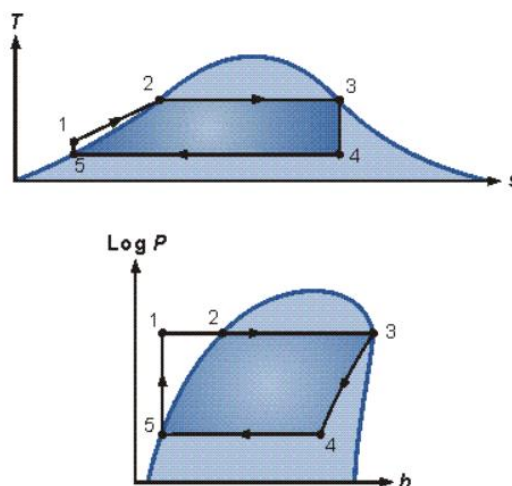


Joonis 1.1 Carnot' tsükli diagramm PV ja TS [9]

Carnot' tsükkel on kõrge kasuteguriga soojusmootorite modelleerimise ja projekteerimise võrdlustsükkel, millel on palju praktilisi rakendusi, näiteks soojuspump soojuse tootmiseks ja külmutusseadmed jahutamiseks. Elektri jaamades ja laevades kasutatavad auruturbiinid. Auruturbiinidel kohaldatav Rankine'i tsükkel kattub suurelt jaolt Carnot' tsükliga. [9]

1.2.2 Rankine'i tsükkel

Rankine'i tsükkel on protsess, mida kasutatakse laialdaselt elektri jaamades, nagu kivisöel töötavad või tuumaelektri jaamad. Koostootmissüsteemides kasutatakse Rankine tsükli eralduvat energiat ruumide kütmiseks, tehnoloogiliseks auruks või muudeks madala temperatuuriga protsessideks [11]. Selle tsükli rõhu-entalpia (ph) ja temperatuuri-entroopia (Ts) diagrammid on näidatud joonisel 1.2.



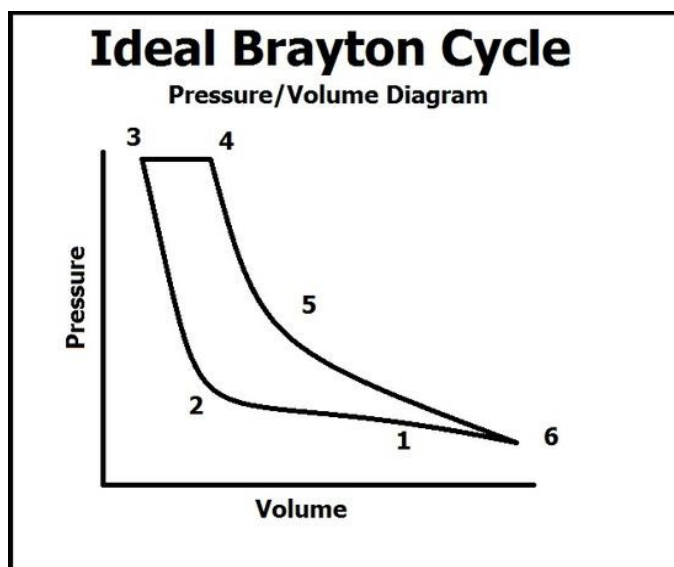
Joonis 1.2 Ts ja ph diagrammid [11]

Rankine'i tsükkel koosneb järgmistest etappidest: 1-2-3 isobaariline soojusvahetus. Vedelik siseneb kõrge surve all katlasse toitepumbast (1) ja kuumutatakse küllastustemperatuurini (2). Täiendav energia lisamine põhjustab vedeliku aurustumist, kuni see muutub täielikult küllastunud auruks (3). 3-4 Isentroopiline paisumine. Aur

paisub turbiinis, teostades niiviisi tööd, mida saab muundada elektriks. 4–5 Isobaariline soojuse ärajuhtimine. Turbiinist (4) väljuv auru-vedeliku segu kondenseeritakse madalal rõhul, tavaliselt pinnakondensaatoris jahutusvee abil. Õigesti projekteeritud ja hooldatud kondensaatorites on aururõhk tunduvalt madalam kui atmosfäärirõhk ja läheneb töövedeliku küllastusrõhule jahutusvee temperatuuril. 5–1 Isentroopiline kokkusurumine. Kondensaadi rõhk toitepumbas tõuseb. Vedeliku väikese erimahu tõttu on pumba töö suhteliselt väike ja on termodünaamilistes arvutustes sageli tähelepanuta jäetud. [11]

1.2.3 Braytoni tsükkel

Braytoni tsükkel on termodünaamiline tsükkel, mida kasutatakse soojus- ja gaasiturbiinmootorites. Braytoni tsükli põhiolemus on saada energiat õhuvoolust ja kütusest, et tekitada kasulikku tööd. Tsükkel koosneb mitmest etapist: energia saamine, kütuseõhuga segatud välisõhu kokkusurumine, põlemine, mille käigus toimub õhu paisumine töö tekitamiseks. Joonisel 1.3 on kujutatud diagramm, mis näitab, et on olemas 6 protsessi, mis kirjeldavad Braytoni tsükli rõhu ja mahu mõttes. [7]



Joonis 1.3 Rõhu/mahu diagramm [7]

(1 -> 3) Välisõhk imetakse kompressorisse, kus gaasi maht väheneb kiiresti põlemiskambri toimuva kokkusurumise tõttu. Kokkusurumise jätkudes hakkab gaasirõhk pärast põlemiskambri mahu täitmist punktis 2 kiiresti tõusma ja saavutab maksimumi punktis 3. Punktis 3 toimub süttimine. (4 -> 6) Süttimisel jääb gaasirõhk konstantseks, sest gaas saab väljuda paisumiskambri, mistõttu aktiveeritud gaasi maht suureneb. Gaasi sattumisel atmosfääri rõhk langeb ja gaasi maht suureneb selleni, mis oli punktis 1.3. Töö toimub gaasi paisumise tagajärjel, mis surutakse suure jõuga paisumiskambri välja. Seda jõudu kasutatakse seejärel turbiinide pööramiseks ja tõmbe tekitamiseks. [7]

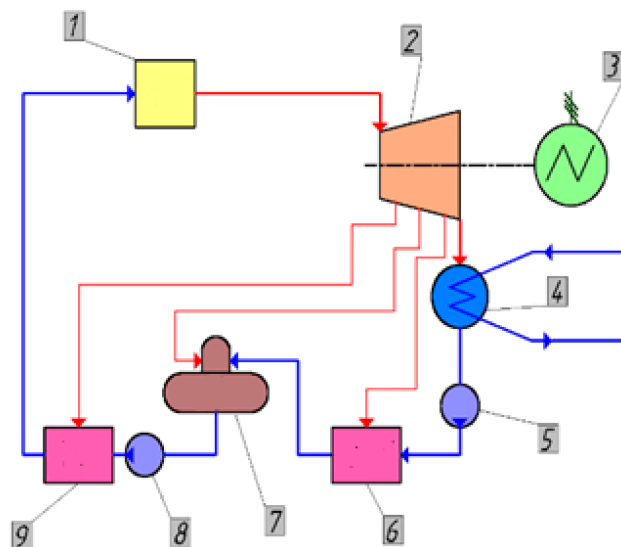
1.3 Auruturbiiniseaded

Auruturbiiniseade kujutab endast pöörlevat soojusmasinat, mis muundab auru sisalduva soojusenergia mehaaniliseks või elektrienergiaks. Auruturbiin koosneb kõige lihtsamal kujul katlast, auruturbiinist, kondensaatorist, toitepumbast ja erinevatest abiseadmetest. Auruturbiinid töötavad Rankine'i tsükli järgi ja neid paneb liikuma kõrge rõhu all olev aur, mis tekib katlas või utilisaator-aurukatlas. Erinevalt gaasiturbiinidest või mikroturbiinidest ei tarbi auruturbiinid kütust otseselt. Protsessi käivitab katel või tehase seadmed, mis toodab soojust utilisaator-katla jaoks. Termodünaamilise tsükli alguses surutakse vesi kõrge rõhuni, mis seejärel kuumutatakse, et toota kõrgsurveauru. Saadud kõrgsurveaur paisub läbi auruturbiini, kus auru energia muundatakse mehaaniliseks energiaks, mis paneb liikuma elektrigeneraatori. Soojuselektrijaam konfiguratsioonide jaoks on auruturbiinist väljuv madalsurveaur on seejärel saadaval, et katta kohapeal soojusvajadust. Kondenseeritud vedelik suunatakse seejärel tagasi pumpa ja tsükkel kordub. [13.1-2]

Auruturbiinid sobivad keskmiste ja suurte tööstus- ja olmeseadmete jaoks, kuna need kasutavad suhteliselt kättesaadavaid ja odavaid kütuseid, nagu kivisüsi, biomass, tahked jäätmed ja kõrvalsaadused (nt hakkepuut), jääkõli ja/või nafta- ja põlevkivi töötlemisel tekkivad heitgaasid. [13, 1].

1.3.1 Auruturbiiniseadmete ja auruturbiinide tüüpide põhimõtteline skeem

Auruturbiiniseadme tööprotsessi põhimõtteline skeem on näidatud joonisel 1.4.



Joonis 1.4 Auruturbiiniseadme skeem:

1 - katlaseade, 2 - turbiin, 3 - elektrigeneraatorid, 4 - kondensaator, 5 - kondensaadipump, 6 - madalrõhu soojendi, 7 - deaeraator, 8 - toitepump, 9 - kõrgrõhu kütteseade [14]

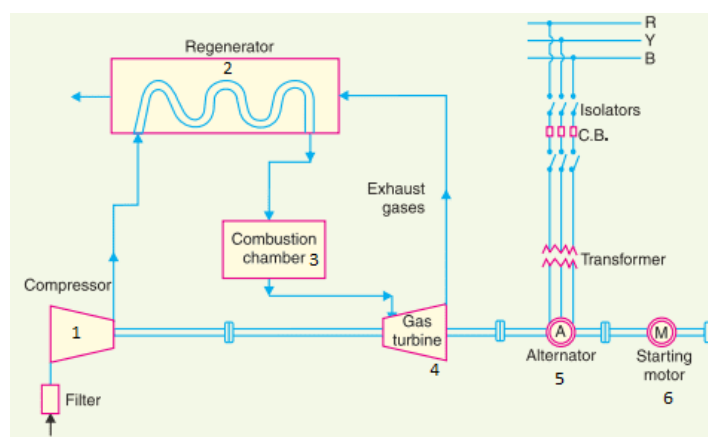
Värske aur katlaseadmest (1), mis on saanud kütuse põletamisel tekkiva soojuse, siseneb turbiini (2) ja teeb seal paisudes mehaanilist tööd, pöörates elektrigeneraatori (3) rootorit. Pärast turbiinist väljumist suunatakse aur kondensaatorisse (4), kus see kondenseerub. Turbiinis ära kasutatud auru kondensaat liigub kondensaadipumba (5) abil läbi madalrõhu soojendi (6) deaeraatorisse (7). Deaeraatorist suunab toitepump (8) vett läbi kõrgrõhu soojendi (9) katlaseadmesse. Soojendid (6) ja (9) ning deaeraator (7) moodustavad toitevee regeneratiivse soojendamise süsteemi, mis kasutab auruturbiini reguleerimata õhuvooludest saadavat auru. [14]

1.4 Gaasiturbiinid

Gaasiturbiin on turbiin, mis kasutab surugaasi pöörlemiseks, et toota elektrit. Gaasiturbiiniseadme töö põhineb Braytoni tsükliil. Kõigis kaasaegsetes gaasiturbiinides tekib surugaas kütuse, näiteks maagaasi, petrooleumi, propaani või lennukikütuse põletamisel. Selle kütuse tekitatud soojus paisutab turbiini läbivat õhku, et saada kasulikku energiat. [18]

1.4.1 Gaasiturbiiniseadme põhimõtteline skeem

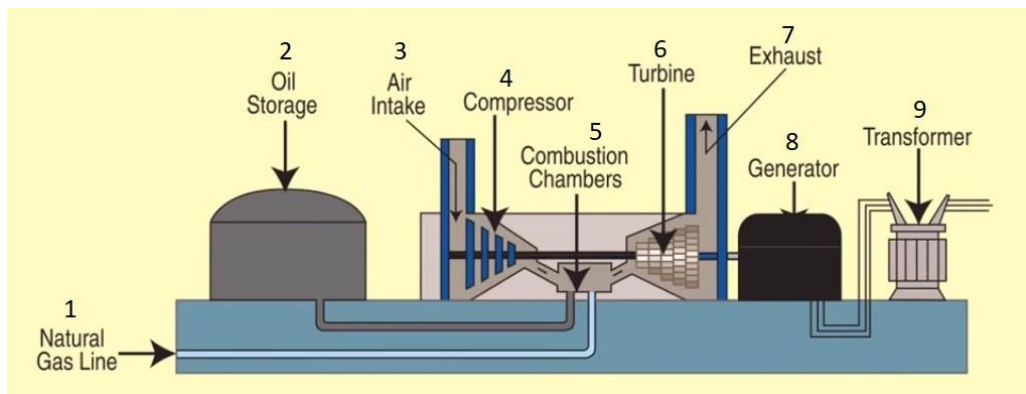
Gaasiturbiiniseadet, mis kasutab elektri tootmiseks peamise mootorina gaasiturbiini, tuntakse gaasiturbiini elektrijaamana. Gaasiturbiini elektrijaamas kasutatakse töökehana õhku. Õhk surutakse kompressoriga kokku ja suunatakse põlemiskambrisse, kus õhule lisatakse soojust, mis tõstab selle temperatuuri. Suruõhule lisatakse soojust kas kütuse põletamisel kambris või õhusoojendite abil. Seejärel juhitakse põlemiskambrit kõrge survega kuum õhk gaasiturbiini, kus see paisub ja teostab mehaanilist tööd. Gaasiturbiin paneb liikuma vahelduvvoolu generaatorit, mis muundab mehaanilist energiat elektrienergiaks. Gaasiturbiini elektrijaama skeem on näidatud joonisel 1.5. [28]



Joonis 1.5 Gaasiturbiiniseadme põhimõtteline skeem:
1 - õhukompressor, 2 - regeneraator, 3 - põlemiskamber, 4 - gaasiturbiin, 5 - generaator, 6 - käivitusmootor [28]

Gaasiturbiiniseadmed on teoreetiliselt lihtsad ja koosnevad kolmest põhiosast, nagu on näidatud joonisel 1.6:

- õhukompressor (4) - võtab õhku väljastpoolt turbiini ja tõstab selle rõhku. Mõnes turbiinis võib õhurõhk olla kuni 30 korda suurem sisendrõhust;
- põlemiskamber (5) - põletab kütust ja toodab gaasi kõrge rõhu ja suure kiirusega. Kõrgsurveõhk siseneb sellesse tsooni, kuhu suunatakse kütust. Sellesse osasse pihustatakse pidevalt kütust, et turbiini läbiv energia oleks konstantne;
- turbiin (6) - saab energiat põlemiskambri tulevast gaasist. Turbiin on võlliga ühendatud kompressori labadega ja need pöörlevad eraldi. Kompressorid ühendatakse turbiiniga, mis on ühendatud väljundvõlliga ja kuna turbiin pöörleb eraldi, võib see kuumade gaaside läbivoolu tõttu saavutada tohutuid kiirusi. [18]



Joonis 1.6 Gaasiturbiiniseade:

1 - gaaskütus, 2 - vedelkütus, 3 - õhukanal, 4 - kompressor, 5 - põlemiskamber, 6 - turbiin, 7 - heitgaasid, 8 - generaator, 9 - transformaator [39]

Gaasiturbiiniseadmed kasutavad kvaliteetseid vedel- või gaaskütuseid ja seetõttu on neil madal kulutasuvus. Väikese kapitaliinvesteeringu korral ehitisse on neil suurim manööverdusvõime. Gaasiturbiiniseadmete kõrge müra tõttu tekib vajadus täiendava heliisolatsiooni ja õhu sisselaskeseadmete järele. Õhukompressor tarbib olulise osa (kuni 60%) gaasiturbiini sisemisest võimsusest, mistõttu on gaasiturbiiniseadme elektrilise koormuse muutuste ulatus väike. [12, 43]

Kõigi gaasiturbiinide tööpõhimõte on jagatud järgmisteks etappideks:

1. kütuse-õhu segu süttimine. Gaasiturbiin surub õhku kokku ja segab selle kütusega, mis seejärel põletatakse ülikõrgel temperatuuril, tekitades kuumade gaasi;
2. turbiini labade pöörlema panemine kuumade gaasiga. Kuum kütuse-õhu segu läbib turbiini labade, pannes neid kiiresti pöörlema;

3. pöörlevad labad panevad pöörlema veovõlli. Kiiresti pöörlevad turbiini labad panevad pöörlema turbiini veovõlli;
4. turbiini pöörlemine toidab generaatorit. Pöörlev turbiin on ühendatud vardaga generaatoris, mis paneb pöörlema suurt magnetit, mida ümbritsevad vasktraadist mähised;
5. generaatori magnet paneb elektronid liikuma ja tekitab elektrit. Kiiresti pöörlev generaatori magnet loob võimsa magnetvälja, mis kogub vaskmähiste ümber elektrone ja paneb need liikuma. Nende elektronide liikumine mööda traati ongi elekter. [17]

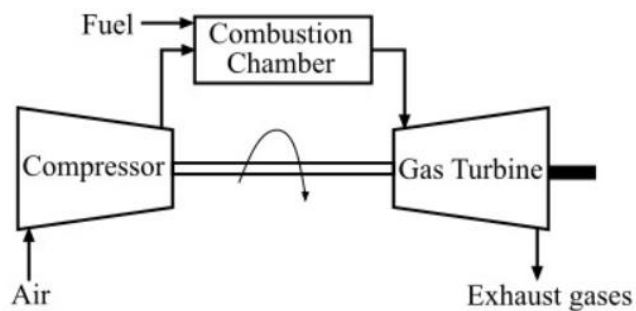
1.4.2 Gaasiturbiinide tüübid

Sõltuvalt töotsüklist jagunevad gaasiturbiinid kaheks:

- avatud tsükliga gaasiturbiin;
- suletud tsükliga gaasiturbiin. [19]

1.4.2.1 Avatud tsükliga gaasiturbiin

Gaasiturbiini tüüpi, milles turbiini pöörlemiseks vedelkütuse põlemisel tekkivad kuumad gaasid ja ülejäänud soojus heidetakse atmosfääri, nimetatakse avatud tsükliga gaasiturbiiniks. Avatud ahelaga gaasiturbiini põhimõtteline skeem on näidatud joonisel 1.7. [20]



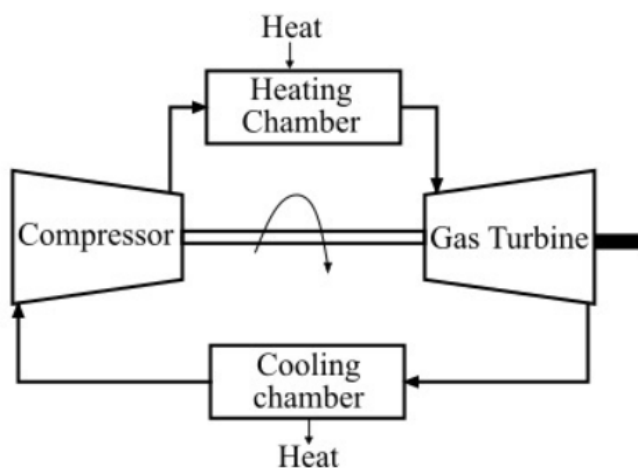
Joonis 1.7 Avatud ahelaga gaasiturbiini põhimõtteline skeem [20]

Avatud tsükliga gaasiturbiini põhiosad on: kompressor, põlemiskamber ja turbiin. Avatud tsükliga gaasiturbiinis võtab kompressor atmosfäärist värsket õhku ja surub selle kokku, seejärel segatakse see suruõhk kütusega ja pihustatakse põlemiskambrisse. Põlemiskambris tõuseb kütuse põletamisel suruõhu temperatuur. Need kõrge survega kuumad gaasid läbivad turbiini labasid, et panna turbiini pöörlema. [20]

Lõpuks, pärast turbiini pöörlemist, heidetakse gaasid atmosfääri ja kompressorisse suunatakse värsket atmosfääriõhku, protsess kordub. [20]

1.4.2.2 Suletud tsükliga gaasiturbiin

Suletud tsükliga gaasiturbiin on teatud tüüpi gaasiturbiin, milles turbiini sees ringleb pidevalt õhk. Suletud ahelaga gaasiturbiini puhul moodustab küttegaas suletud termodünaamilise süsteemi, milles heitgaase ei heideta atmosfääri, vaid jahutatakse jahutuskambris ja suunatakse tagasi kompressorisse. Suletud ahelaga gaasiturbiini põhimõtteline skeem on näidatud joonisel 1.8. [20]



Joonis 1.8 Suletud ahelaga gaasiturbiini põhimõtteline skeem [20]

Suletud tsükliga gaasiturbiin koosneb kompressorist, kuumutuskambrist, gaasiturbiinist ja jahutuskambrist. Seda tüüpi gaasiturbiin töötab Braytoni tsükliil. Milles töökeha kasutatakse korduvalt turbiinisüsteemist lahkumata. Suletud tsükliga gaasiturbiinis surutakse gaas või õhk kompressoriga kokku, mis seejärel suunatakse kuumutuskambrisse. Kuumutuskambris soojendatakse suruõhku või gaasi välisest allikast tuleva soojuse abil, enne kui see liigub turbiinilabade kohal. Kui need kuumad ja kokkusurutud gaasid voolavad ümber turbiinilabade, nad paisuvad ja panevad turbiini pöörlema ning jõuavad lõpuks jahutuskambrisse, kus neid jahutatakse ja gaasid suunatakse tagasi kompressorisse tsükli kordamiseks. [20]

1.5 Elektritootmise kombineeritud tsüklid kombineeritud aurugaasi seadmete abil

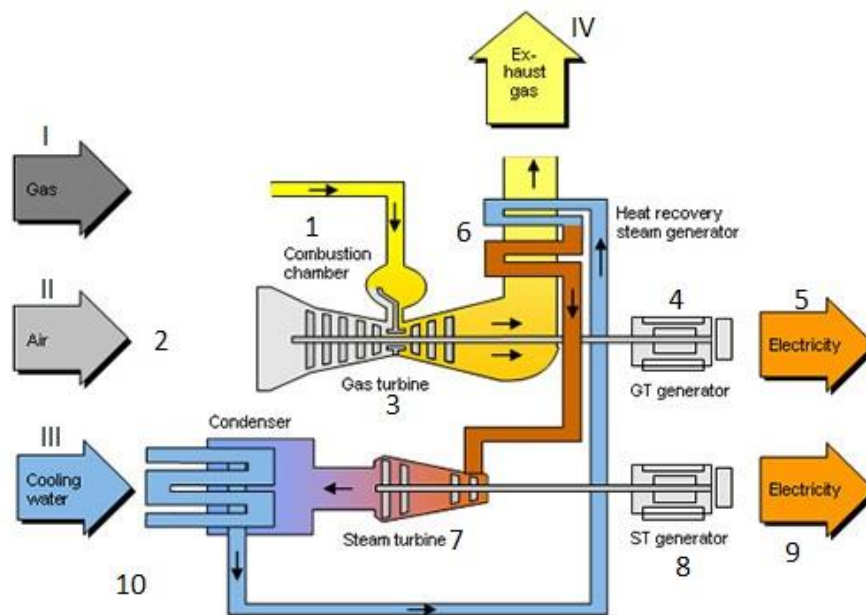
Kombineeritud tsüklite kasutamisel on head väljavaated, kuna need võimaldavad suurendada ettevõtte elektri- ja soojusenergia tootmise efektiivsust.

Aurugaasiseade on elektritootmisjaam, mille eesmärk on elektrienergia tootmine. Süsteemist väljuvad kuumad gaasid kasutatakse soojusenergia saamiseks täiendava elektritootmise allikana. See erineb aurujõu- ja gaasiturbiiniseadmetest suurema kasuteguri poolest. [21]

Elektritootmises on kombineeritud tsükliga elektrijaam soojusmootorite kogum, mis töötavad koos kasutades ühte ja sama soojusallikat, muundades selle mehaaniliseks

energiaks elektrigeneraatorite ajamiseks. Põhimõte seisneb selles, et kui tsükkel on lõppenud (gaasiturbiin), on töötava vedeliku temperatuur süsteemis ikka veel piisavalt kõrge (umbes 500 °C) selleks, et teine järjestikune soojusmootor saaks esimese mootori toodetud soojusest energiat välja võtta. Tootes energiat mitmest töövoost, saab süsteemi üldist netoefektiivsust tõsta 50-60% võrra. See tähendab, et üldisest efektiivsusest 34% (lihttsükkel) kuni üldise efektiivsuseni 62% (kombineeritud tsükkel), mis on 84% teoreetilisest efektiivsusest (Carnot' tsükkel). [21]

Aurugaasi seadme töö põhimõtteline skeem on näidatud joonisel 1.9.



Joonis 1.9 Aurugaasiseadme töö põhimõtteline skeem:

1- põlemiskamber, 2,3- gaasiturbiin, 4- GT elektrigeneraator, 5,9- elektri väljund, 6- utilisaator-katel, 7- auruturbiin, 8- ST elektrigeneraator, I - gaas, II- õhk, III- jahutusvesi , IV- väljuvad gaasid [40]

Alguses siseneb gaas gaasiturbiini (1) põlemiskambrisse. Gaasiturbiini suunatakse ka rõhu all olev atmosfääriõhk (2). Gaaside segu põletatakse gaasiturbiini (3) põlemiskambrites, mis pöörab oma elektrigeneraatorit (4) ja selles etapis toimub elektri tootmine (5) (Braytoni tsükkel). Ülejäänud põlemisproduktide soojus pärast gaasiturbiini juhitakse utilisaator-katlasse (6), mis on põhimõtteliselt soojusvaheti, õigemini soojusvahetite seeria. Seda nimetatakse ka katlaks, kuna selles tekib aur auruturbiini jaoks, juhtides gaasiturbiini või sisepõlemismootori kuumade heitgaaside voogu läbi soojusvaheti torude rea. Ülejäänud soojus toodetakse ülekuumutatud aurust, mis suunatakse auruturbiini (7), mis paneb pöörlema elektrigeneraatorit (8), tootes elektrit (9) (Rankine'i tsükkel). Vesi pärast auruturbiini suunatakse uuesti kuumutamisele (10). Meetodil on mitmeid modifikatsioone, eelkõige siis, kui pärast gaasiturbiini põletatakse utilisaator-katlas täiendavat gaasikütust ja suurendatakse

veelgi tsükli aurujõu osa (muutub tsükli binaarsuse aste). Sellisel juhul suureneb paigaldise elektrienergia koguvõimsus, kuid paigaldise üldine kasutegur mõnevõrra väheneb.

EELISED:

- võimaldavad saavutada elektrilist kasutegurit vahemikus 58-64%. Aurujõuseadmete puhul on kasutegur näiteks vahemikus 33-45%, gaasiturbiiniseadmete puhul – 28-42%;
- tarbivad toodetud elektriühiku kohta vähem vett võrreldes aurujõuseadmetega; [22]
- Aurugaasi seadmed on suhteliselt uut tüüpi elektrijaamad, mis töötavad gaasil, vedelal või tahkel kütusel. [21]

Puudused:

- kütuse põletamiseks kasutatav õhk on vaja filtreerida. [22]

2. OLEMASOLEVA ELEKTRI- JA SOOJUSENERGIA TOOTMISE TEHNOLOOGIA KIRJELDUS

Elektri ja soojuseenergia tootmise tehnoloogiaks on auru saamine, mis suunatakse turbiinidesse elektrienergia tootmiseks ja soojusvahetitesse kütteks vajalikku soojuseenergia tootmiseks.

Kütusest ja energiaressurssidest energia saamine nende põletamise teel on praegu kõige lihtsam ja kättesaadavam viis energia tootmiseks. Sel juhul on võimalik nii soojus- ja elektrienergia koostootmine näiteks soojuselektrijaamades kui ka nende eraldi tootmine. [25]

Soojuselektrijaamad töötavad fossiilkütustel – maagaas, kivisüsi, kütteõli, turvas, põlevkivi. Katlas soojendatud vesi muundatakse auruks, mis juhitakse auruturbiini. Selle pöörlemine muudab mehaanilise energia elektrivooluks. [26]

Eestis kasutatakse kütusena maagaasi, puidujäätmeid ja olmejäätmeid. Ida-Virumaal kasutatakse selliseid kütuseliike nagu: generaatorgaas kütteväärtusega 2930–3977 kJ/nm³, põlevkivi kütteväärtusega 7,53–9,20 MJ/kg ja kõrge kütteväärtusega poolkoksigaas kütteväärtusega 37672 - 43951 kJ/nm³ (soojusekvivalent kuni 19,5 MW).

2.1 Poolkoksigaas gaasiturbiiniseadmete kütusena

2.1.1 Poolkoksigaasi tootmine

Põlevkivi töötlemise põhieesmärk on saada tooteid vedelate põlevkiviõlide kujul. Põlevkivi töötlemise üks kõrvalsaadus on kõrge kütteväärtusega poolkoksigaas, mida

kasutatakse soojus- ja elektrienergia tootmiseks. Eestis tekib poolkoksigaasi GALOTER põlevkivi töötlemise tehnoloogiaid kasutavates ettevõtetes. [4,10]

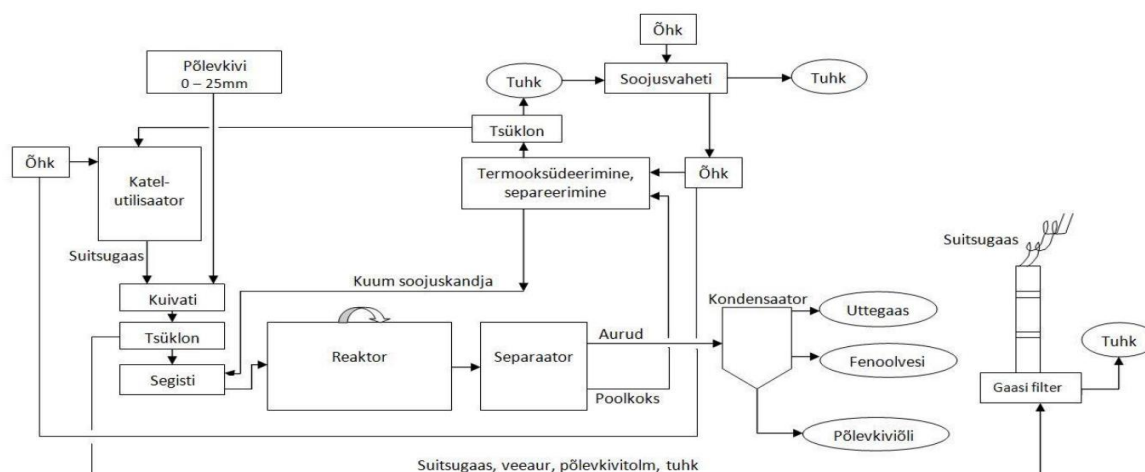
2014. aastal toodeti Eestis poolkoksigaasi põlevkivi töötlemisel järgmistes ettevõtetes:

- Eesti Energia Õlitööstus ASis kahel ENEFIT-140 seadmel gaasi tootlikkusega 5300 Nm³/h ja ENEFIT-280 gaasi tootlikkusega 12500 Nm³/h;
- VKG ASis kolmes Petroteri tehases gaasi tootlikkusega 5200–5600 Nm³/h;
- Kiviõli Keemiatööstus AS-is kahel UTT-500 seadmel retortgaasi tootlikkusega ca 800 nm³/h.

Lisaks kasutatakse lõputöö eesmärkide täitmiseks VKG Oil ja VKG Energia OÜ andmeid. Ettevõttes VKG OIL nimetatakse GALOTERi tehnoloogiat PETROTER.

GALOTERi protsessi põhimõtteline skeem on näidatud joonisel 2.1. [15, 7]

Protsessi idee seisneb selles, et poolkoksi (pürolüüsijääkide) põletamisel tekkivat tuhka kasutatakse soojuskandjana, mis suunatakse pärast pürolüsaatorit põletamisele aerofontäänkatlasse. Vastavalt sellele eraldatakse tuhk pärast aerofontäänkatlat suitsugaasidest tsüklonites ja suunatakse vajalikus koguses tagasi pürolüüsiseadmesse, milleks kasutatakse silindrilist pöörlevat reaktorit ehk retorti. [4,14]



Joonis 2.1 Galoter tööprotsessi põhimõtteline skeem [30]

Pärast pürolüüsiseadet ja lendtuha puhastussüsteemi suunatakse auru-gaasi segu kondensaatorisse, kus sellest eraldatakse lõpp-produkti – erinevad põlevkiviõli fraktsioonid ja kõrvalsaadusena gaasiline aine – poolkoksigaas. [4,14]

Poolkoksi gaas koosneb küllastunud ja küllastumata süsivesinikest, metaanist, vesinikust, süsinikmonooksiidist ja vähesel määral ballastist süsinikdioksiidi ja molekulaarse lämmastiku kujul. [4,15]

Poolkoksigaas on üsna ebastabiilne ja seda ei ole võimalik ladustada, mistõttu suunatakse Petroteri tehastes tekkinud poolkoksigaas põletamisele VKG Energia OÜ soojuselektrijaama elektrikateldes.

2.1.2 Poolkoksigaasi füüsikalised ja keemilised omadused

Käesolevas lõputöös käsitletakse energiatoormena VKG OIL AS poolkoksigaasi. Keskmise gaasikoostis on esitatud tabelis 2.1.

Gaas sisaldab mürgiseid ühendeid (CO, H₂S, merkaptaanühendid). Võib kõrgel temperatuuril ise süttida ja on vastavate stõhhiomeetriliste kontsentratsioonide korral plahvatusohtlik. [3, 255-256]

Tabel 2.1 Keskmise poolkoksigaasi koostis

Jrk nr	Nimetus	Komponendid	Komponentide mahukontsentratsioonid, %	Vahemik, %
1	süsihappegaas	CO ₂	9,50	2,68 – 13,57
2	etüleen	C ₂ H ₄	10,70	7,53 – 12,61
3	etaan	C ₂ H ₆	8,30	4,93 – 9,14
4	propüleen	C ₃ H ₆	7,83	4,65 – 7,88
5	propaan	C ₃ H ₈	2,81	1,97 – 3,23
6	butüleen	C ₄ H ₈	2,67	0,78 – 3,35
7	butaan	C ₄ H ₁₀	1,12	0,89 – 1,31
8	pentaan	C ₅ H ₁₂	6,70	3,73 – 11,19
9	vesinik	H ₂	14,38	8,85 – 17,52
10	lämmastik	N ₂	8,49	2,42 – 26,84
11	metaan	CH ₄	15,38	10,55 – 21,40
12	süsinikdioksiid	CO	9,68	8,17 – 12,97
13	hapnik	O ₂	0,20	0,02 – 0,97
14	vesiniksulfiid	H ₂ S	2,24	0,87 – 3,30
	Kokku	%	100	

Keskmise koostisega poolkoksigaasi põlev osa koosneb – H₂ = 18,1%, CO = 12,2%, CH₄ = 19,3%, C_nH_{2n+2} = 19,6%, C_nH_{2n} = 30,8%. Peamised komponendid on küllastunud ja küllastumata süsivesinikud ning metaan. Vesiniku ja süsinikmonooksiidi sisaldus on suhteliselt väiksem. Poolkoksigaas sisaldab suures osas suure molekulmassiga komponente.

Gaas sisaldab mõningas mahus C₅₊ ja kõrgemaid kondenseeritud süsivesinikke, mida mõnikord nimetatakse gaasibensiiniks (erinevalt põlevkivibensiinist, mis on põlevkiviõli kerge fraktsioon ja põlevkivitöötlemise seadmete turustatav toode).

Tabel 2.2 Poolkoksigaasi füüsikalised konstandid [29]

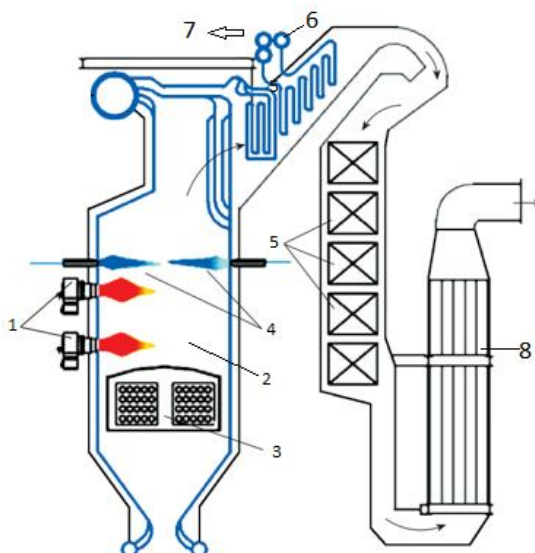
Jrk nr	Gaasi koostis:	P, kg/m ³	Cp, kJ/(kg*K)	μ, Pa*m	λ, W/(m*K)
1	CO ₂ – süsihappegaas	1,96	0,831	0,00001483	16,55

Jrk nr	Gaasi koostis:	P, kg/m ³	Cp, kJ/(kg*K)	μ, Pa*m	λ, W/(m·K)
2	C ₂ H ₂ – etüleen	1,24	1,516	0,00001027	0,0205
3	C ₂ H ₆ – etaan	1,34	1,716	0,00000929	0,02125
4	C ₂ H ₆ – propüleen	1,88	1,620	0,00000855	0,0166
5	C ₃ H ₈ – propaan	1,97	1,849	0,00000811	0,0189
6	C ₄ H ₈ – butüleen	2,50	0,091	0,00000775	0,015875
7	C ₄ H ₁₀ – butaan	2,59	2,015	0,00000749	0,015875
8	C ₅ H ₁₂ – pentaan	3,22	2,077	0,0000068	0,01415
9	H ₂ – vesinik	0,09	14,157	0,0000084	0,0240146
10	N ₂ – lämmastik	1,25	1,039	0,00001788	0,0259
11	CH ₄ – metaan	0,72	2,206	0,00001114	0,0801
12	CO – süsinikdioksiid	1,25	1,039	0,0000279	0,04257
13	O ₂ – hapnik	1,43	0,906	0,0000207	0,0268
14	H ₂ S – vesiniksulfiid	1,52	1,051	0,00001179	0,0132

2.1.3 Olemasoleva elektri- ja soojusenergia tootmise tehnoloogia kirjeldus VKG Energia näitel

Praegu põletatakse VKG-s poolkoksigaasi elektri ja soojusenergia tootmiseks.

Põlevkivi töötlemise gaasiliste saaduste põletamine toimub kateldes, nagu näiteks VKG ENERGIA OÜ koosseisu kuuluva Kohtla-Järve põlevkivitöötlemistehase elektri jaama katel BKZ-75-39 või katel TP-101 (Ep-640/135). [31, 54–55]



Joonis 2.2 BKZ-75-39 skeem:

1 – poolkoksigaasi põletid, 2 – katla kolle, 3 – generaatorgaasi põletid, 4 – tertsiaarsed õhudüüsid NO_x vähendamiseks, 5 – ökonomaiser, 6 – auruülekuumendi, 7 – ülekuumendatud aur auruturbiinile, 8 – õhusoojendi [31, 58]

Joonisel 2.2 on näidatud VKG ENERGIA OÜ ettevõttes paigaldatud jaama nr 5 katel. Poolkoksi- ja generaatorgaasi põletamine toimub läbi põletite (1,3). Tertsiaarne õhk suunatakse läbi düüside (4), et vähendada NOx emissiooni, kasutades katla koldes (2) astmelist põletustehnoloogiat. Tekkinud suitsugaasid, mis läbivad aurülekuumendi (6), soojendavad vett torudes, kust ülekuumendatud aur suunatakse turbiini (7) elektri- ja soojusenergia tootmiseks. Pärast aurülekuumendit soojendavad suitsugaasid ökonomaiseris (5) katla toitevett. Õhusoojendi (8) läbimisel soojendavad suitsugaasid õhku, mis suunatakse poolkoksi- ja generaatorgaasi põletitesse (1.3).

2.1.4 Poolkoksigaasi kasutamine gaasiturbiiniseadmetes ja aurugaasi tsükliliga seadmete loomine

Käesoleva töö eesmärgiks on kaaluda kombineeritud tsükli kasutamise võimalust soojuselektrienergia tootmiseks kasutades kütusena poolkoksigaasi, teostada tehniline arvutus ja majanduslik hinnang antud tehnoloogia otstarbekuse kohta.

Eeldatakse, et kütus kombineeritud tsükli kasutamiseks olemasoleval aurujõutsüklil tuleb eelnevalt ette valmistada. See ettevalmistus hõlmab: poolkoksigaasi jahutamist väärtuslike kondenseeruvate küllastumata süsivesinike eraldamiseks ja gaasirõhu tõstmist turbiini ees nõutava väärtuseni. Nendel eesmärkidel on vajalik seadmete (soojusvaheti ja kompressor) tehnoloogiline arvutus.

Poolkoksigaasi kasutamise korral aurugaasi tsüklis on vaja teha kohandusi gaasiturbiiniseadme konstruktsioonis, samuti arvestada osa süsivesinike kondenseerumisega poolkoksigaasist. See võimaldab saada täiendavat kogust toodetud põlevkiviõli ja -bensini.

Samuti tuleb tehnoloogia arvutamisel ja väljatöötamisel arvesse võtta poolkoksigaasi spetsiifilisi omadusi, mille hulka kuuluvad selle koostis, põlemissoojus, temperatuur ja põlemiskiirus ning suures koguses küllastumata süsivesinike olemasolu.

Seega analüüsiti arvutusosas võimalikke seadmeid kombineeritud tsükliliga elektritootmise tehnoloogia rakendamiseks, aga ka süsteemi enda üksikute elementide arvutamist, mille hulka kuuluvad:

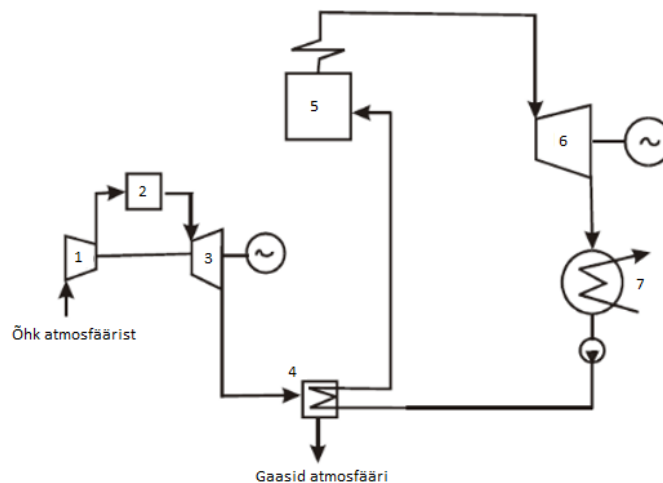
1. põhimõttelise soojusskeemi väljatöötamine VKG ENERGIA OÜ jaoks olemasoleva keskrõhukatlamaja baasil (katel BKZ 75-39 + auruturbiin);
2. perspektiivse gaasiturbiinide mudeli valik poolkoksigaasi põletamiseks;
3. soojusvaheti arvutamine poolkoksigaasi ettevalmistamiseks gaasiturbiini suunamiseks;
4. gaasikompressori arvutamine, et tagada vajalik rõhk gaasiturbiini suunamiseks;
5. elektrijaamade moderniseerimise otstarbekuse majanduslik hinnang, võttes arvesse efektiivsuse (kasutegur) suurendamise saavutatavat taset.

3. ARVUTUSLIK OSA

3.1 Soojuskeemide väljatöötamine ettevõtte VKG ENERGIA OÜ jaoks

Gaasiturbiinide kasutamiseks aurugaasi tsükli korraldamiseks juba töötavates VKG auruelektrijaamas sobivad järgmised skeemid.

Eelkõige 1) languskeem ja 2) mahavõttuskeem järelpõletusega, kuna gaasiturbiini heitgaas sisaldab kuni 15% hapnikku. Samas võib olemasoleval aurukatlal osutada vajalikuks teostada taatlussoojustehniline arvutus ja osade katla küttepindade võimalik vähene rekonstrueerimine (see analüüs ei sisaldu käesolevas lõputöös).

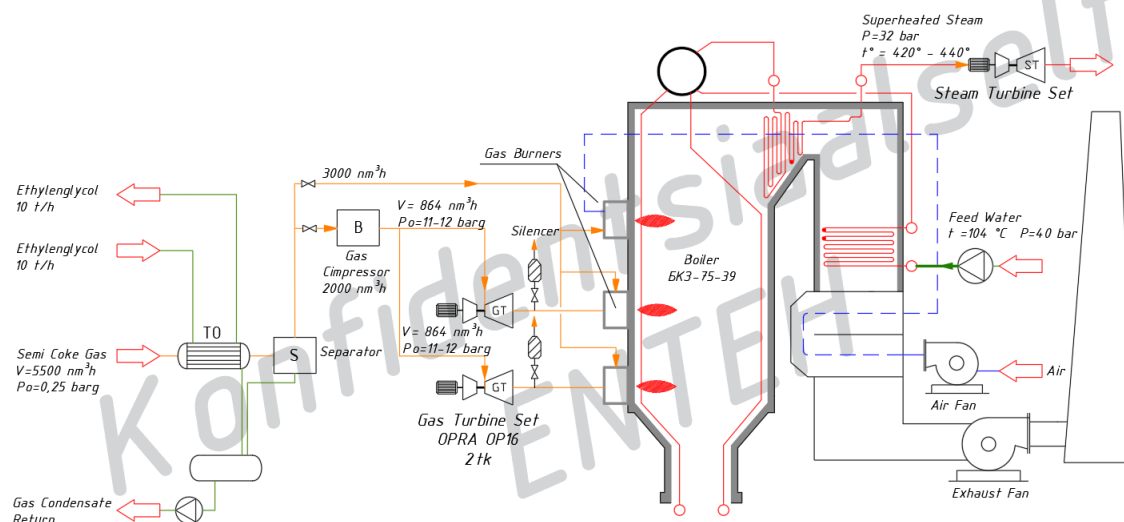


Joonis. 3.1 Aurugaasiseadme elementaarne skeem, mis kasutab toitevee soojendamiseks gaasiturbiini heitgaaside soojust:

1 - kompressor, 2 - põlemiskamber, 3 - gaasiturbiin, 4 - gaasi-veesoojendi, 5 - aurukatel, 6 - auruturbiin, 7 - kondensaator. [32, 6]

Käsitleme aurugaasiseadet kui seadet, mis koosneb kahest astmest: gaas ja aur. Võimsuste ja soojuse tarbimise arvutamine toimub aurugaasiseadme gaasi ja auru astmete jaoks eraldi. Esimeses etapis teostatakse gaasiturbiiniiseadme ja auruturbiiniiseadme soojuskeemide arvutus nende autonoomse töötamise ajal. Teises etapis teostatakse gaasiturbiiniiseadme ja auruturbiiniiseadme termiliste skeemide ümberarvutus, kui nad töötavad aurugaasiseadme osana.

Kombineeritud tsükli arvutus teostatakse ettevõttes VKG Energia. Pakutakse välja järgmine ENTEH Engineering AS poolt katla BKZ-75-39 jaoks välja töötatud tehnoloogiline skeem.



Joonis. 3.2 Kombineeritud tsükli tehnoloogiline skeem

Elektri ja soojuse tootmise tehnoloogia seisneb gaasiturbiinide ja katla BKZ-75-39 kombinatsiooni kasutamises, mis on näidatud joonisel 3.2.

Alguses toimub poolkoksigaasi ettevalmistus kasutamiseks. Poolkoksigaas kuluga 5500 m³/h, rõhuga 0,20–0,25 baari ja temperatuuriga 40 °C siseneb soojusvahetisse jahutamiseks etteantud etüleenglükooli külmutusagendi kuluga - 10 t/h kuni 8 °C. Poolkoksigaasi jahutamise käigus kondenseerub osa gaasist vedelikuks, mis eemaldatakse soojusvahetist ja eraldatakse separaatoris.

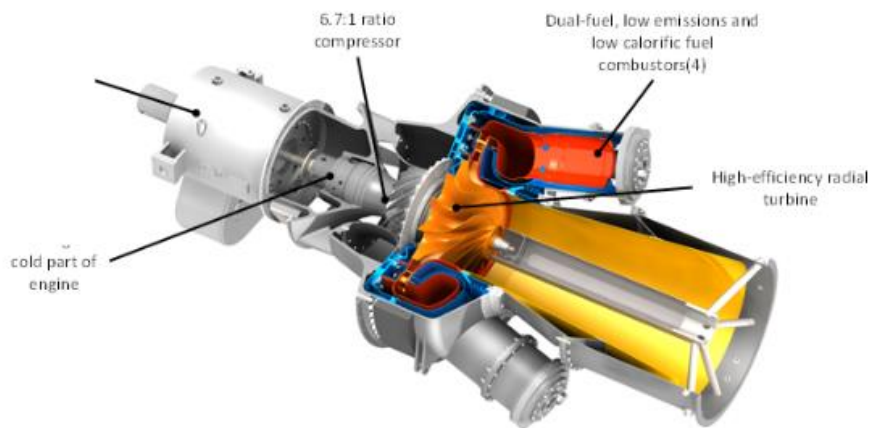
Jahutatud gaas jagatakse kaheks vooluks, millest üks vool kuluga ca 3000 m³/h suunatakse põletamisele otse aurukatlasse, teine kuluga 2000 m³/h suunatakse kompressorisse, kus toimub selle kokkusurumine 0,2 kuni 11 baari.

Surugaas suunatakse kahele gaasiturbiiniseadmele põletamiseks ja elektri tootmiseks. Väljuvad suitsugaasid juhitakse aurukatlasse, kus nad annavad oma soojuse üle auru moodustamiseks ja elektrienergia tootmiseks katla auroturbiinis. Protsessi lõpus heidetakse suitsugaasid atmosfääri.

3.2 Perspektiivse gaasiturbiinide mudeli valik poolkoksigaasi põletamiseks

Käesolevas lõputöös esitatud gaasiturbiinide analüüs põhineb ENTEH Engineering ASi kogemustel selles valdkonnas. Samal ajal tunnistati mittestandardse kütusega töötamiseks sobivateks OP16 seeria gaasiturbiinid, mida toodab OPRA Turbines BV (Holland) võimsusega 1,85 MW ja mida kasutatakse edukalt detsentraliseeritud soojuse ja elektri koostootmissüsteemides kogu maailmas. 2014. aastal esitleti gaasiturbiin

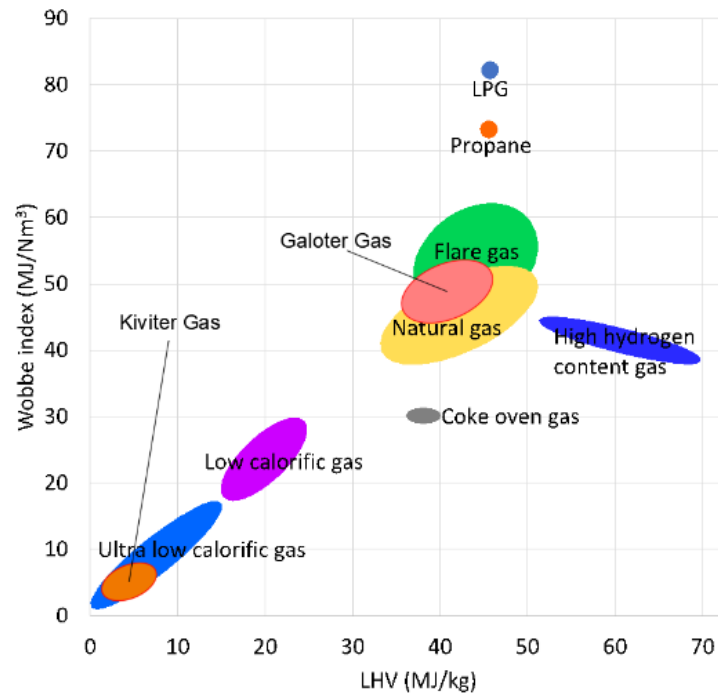
OP16-3C, mis on varustatud uue põlemissüsteemiga ning mis on võimeline töötama mittestandardsetel kütustel.



Joonis 3.3 Gaasiturbiin OP16 [33, 5]

Sarnased turbiinid põletavad kaasnevat gaasi naftatootmise käigus. OP16 gaasiturbiini ainulaadne täisradiaalne konstruktsioon muudab selle väga sobivaks alternatiivkütustel töötamiseks, mida üldiselt peetakse gaasiturbiinide jaoks liiga keerukaks.

Energiatiheduse põhjal analüüsis ENTEH Engineering AS sellel turbiinil töötamiseks kasutatavat poolkoksigaasi (joonis 3.3). Gaaskütuse energiatihedus sõltub peamiselt süsivesinike (metaan, etaan jne), lahjendite (näiteks lämmastik ja süsinikdioksiid) (joonis 3.3), süsinikmonooksiidi ja vesinikku mahust. Tavaline maagaas koosneb enamasti metaanist, kuid selle kvaliteet (st energiatihedus) on piirkonniti erinev. Tõrvikugaas (nimetatakse ka kaasnevaks gaasiks) on naftatootmise kõrvalsaadus. See gaas sisaldab lisaks metaanile märkimisväärses koguses küllastumata süsivesinikke. Samuti võib see sisaldada rohkem väävlit kui maagaas. Teist tüüpi kütust kasutatakse näiteks kivisöe gaasistamisel (söekihi metaan) ja koksi (koksigaas) tootmisel. Kõrge vesinikusisaldusega gaas on tüüpiline naftakeemia- ja naftarafineerimistööstuse toode. Jooniselt 3.4 on näha, et seda tüüpi masinatele sobib poolkoksigaas (Galoteri gaas).



Joonis 3.4 Erinevate gaasikütuste liigitus kütteväärtuse järgi [34]

3.3 Soojusvaheti arvutamine poolkoksigaasi ettevalmistamiseks gaasiturbiini suunamiseks

Elektrijaama kateldes põletamiseks suunatav poolkoksigaas sisaldab C_{5+} süsivesinikke. Mõnede nende süsivesinike eraldamine poolkoksigaasist toob kaasa täiendava koguse tooraine – bensiinifraktsiooni – moodustumise, mida saab kasutada turustatavate toodete saamiseks. Süsivesinike kondenseerumine toimub poolkoksi gaasi temperatuuri langetamisel 0-5 °C-ni. Poolkoksigaasi jahutatakse käesolevas lõputöös arvatud kesttoru-soojusvahetis etüleenglükooli vesilahusega.

Soojusvahetites kuumutatud etüleenglükool jahutatakse omakorda aurukompressioonjahutis (chiller).

Pärast soojusvahetit läbib jahutatud poolkoksigaas gaas-vedelik separaatorit, kus eraldatakse gaasi ja vedeliku ning süsivesiniku ja vee faasid. Vedelad tooted kogutakse separaatori alumisse ossa ja ülejäänud gaas suunatakse edasi elektrijaama.

Poolkoksigaasist kondenseerunud aurud koosnevad veest ja süsivesinike fraktsioonidest. Kuna nende ainete tihedus on erinev, toimub separaatoris eraldumine pürolüüsiveeks ja põlevkivibensiiniks. Tekkinud pürolüüsivee ja põlevkivibensiini liigne maht pumbatakse separaatorist tsentrifugaalpumpadega.

Kest-toru-soojusvaheti valimiseks peab teadma:

- soojusvoogu;
- pindalat;
- võimsust;
- kesta läbimõõtu;
- torude arvu ja pikkust.

Arvutame kest-toru-soojusvaheti $5500 \text{ Nm}^3 / \text{tunnis}$ gaasi jahutamiseks alates $t = 40 \text{ }^\circ\text{C}$ kuni $t = 8 \text{ }^\circ\text{C}$. Külmutusagendiks on 40% etüleenglükooli 10 t/h, temperatuur varieerub vahemikus $5 \text{ }^\circ\text{C}$ kuni $25 \text{ }^\circ\text{C}$.

1. Protsessi temperatuuritingimuste arvutamine.

Temperatuuriskeem vastuvoolu jaoks

$$\begin{array}{l} 40 \text{ }^\circ\text{C} \rightarrow 5 \text{ }^\circ\text{C} \\ 25 \text{ }^\circ\text{C} \leftarrow 5 \text{ }^\circ\text{C} \end{array}$$

Keskmine temperatuur

Keskmine ribagaasi temperatuur

$$t_{k.pol} = \frac{t_1'}{t_1''} = \frac{40 + 5}{2} = 22.5 \text{ }^\circ\text{C}$$

Kus:

t_1' , t_1'' sooja gaasi alg- ja lõpptemperatuur, $^\circ\text{C}$.

40% etüleenglükooli keskmine temperatuur

$$t_{k.et} = \frac{25 + 5}{2} = 15 \text{ }^\circ\text{C}$$

Kus t_2' , t_2'' 40% etüleenglükooli alg- ja lõpptemperatuur, $^\circ\text{C}$.

2. Poolkoksigaasi soojuskoormuse arvutamine.

Gaasi jahutamisel eralduva soojuse arvutamine vahemikus 40 kuni 5 viiakse läbi üksikute komponentide järgi. Järgnevalt kasutatavad gaaside andmed on võetud tabelist 2.2.

Arvutame ribagaasi tiheduse, teades selle komponentide mahukontsentratsioone tabelist 2.1

$$\rho_{cm} = y_1 \cdot \rho_1 + y_2 \cdot \rho_2 + \dots$$

$$\rho_{CM} = Y_{CO_2} \cdot \rho_{CO_2} + Y_{C_2H_4} \cdot \rho_{C_2H_4} + Y_{C_2H_6} \cdot \rho_{C_2H_6} + Y_{C_3H_6} \cdot \rho_{C_3H_6} + Y_{C_3H_8} \cdot \rho_{C_3H_8} + Y_{C_4H_8} \cdot \rho_{C_4H_8} + Y_{C_4H_{10}} \cdot \rho_{C_4H_{10}} + Y_{C_5H_{12}} \cdot \rho_{C_5H_{12}} + Y_{H_2} \cdot \rho_{H_2} + Y_{N_2} \cdot \rho_{N_2} + Y_{CH_4} \cdot \rho_{CH_4} + Y_{CO} \cdot \rho_{CO} + Y_{O_2} \cdot \rho_{O_2} + Y_{H_2S} \cdot \rho_{H_2S}$$

kus

ρ_{cm} – tihedus, kg/m³;

ρ_1, ρ_2, \dots – gaasisegu komponentide tihedus, kg/m³;

y_1, y_2, \dots – gaasisegu komponentide mahuosad, %.

$$\begin{aligned} \rho_{CM} = & 1.96 \cdot \frac{9.50}{100} + 1.24 \cdot \frac{1070}{100} + 1.34 \cdot \frac{8.30}{100} + 1.88 \cdot \frac{7.83}{100} + 1.97 \cdot \frac{2.81}{100} + 2.50 \cdot \frac{2.67}{100} + 2.59 \cdot \frac{1.12}{100} \\ & + 3.22 \cdot \frac{6.70}{100} + 0.09 \cdot \frac{14.38}{100} + 1.25 \cdot \frac{8.49}{100} + 0.72 \cdot \frac{15.38}{100} + 1.25 \cdot \frac{9.68}{100} + 1.43 \cdot \frac{0.20}{100} \\ & + 1.52 \cdot \frac{2.24}{100} = 1.33 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \end{aligned}$$

Gaaside massikogus

$$G_{komp.} = \frac{\rho_{CM} \cdot V}{3600} = \frac{1.33 \cdot 5500}{3600} = 2.036 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Poolkoksigaasi soojusmahtuvus arvutatakse soojusmahtuvuse ja iga poolkoksigaasi komponendi mahulise kontsentratsiooni korrutise summast.

$$C_p = \sum C_p \cdot \frac{y}{100}$$

$$\begin{aligned} C_p = & 0.831 \cdot \frac{9.50}{100} + 1.516 \cdot \frac{1070}{100} + 1.716 \cdot \frac{8.30}{100} + 1.620 \cdot \frac{7.83}{100} + 1.849 \cdot \frac{2.81}{100} + 0.091 \cdot \frac{2.67}{100} + 2.015 \\ & \cdot \frac{1.12}{100} + 2.077 \cdot \frac{6.70}{100} + 14.157 \cdot \frac{14.38}{100} + 1.039 \cdot \frac{8.49}{100} + 2.206 \cdot \frac{15.38}{100} + 1.039 \cdot \frac{9.68}{100} \\ & + 0.906 \cdot \frac{0.20}{100} + 1.051 \cdot \frac{2.24}{100} = 3.316 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \end{aligned}$$

Kus:

C_p – soojusmahtuvus, kJ/(kg·K).

Soojuskoormus

$$Q = G_1 c_1 (t_1'' - t_1') = G_2 c_2 (t_2'' - t_2') \quad (2.2)[37]$$

Kus:

Q – soojuskoormus, W;

G – gaasi kulu, kg/s.

$$Q = 2.036 \cdot 3.316 \cdot (313 - 278) = 236,211 \frac{\text{kJ}}{\text{s}} = 236211 \text{ W}$$

3. 40% etüleenglükooli soojuskoormuse arvutamine

Tabel 3.1 40% etüleenglükooli termofüüsikalised omadused [36]

Nimetus	%	P, kg/m ³	μ	λ, W/(m·K)	Cp, kJ/(kg·K)
etüleenglükooli	40	1130	6,72·10 ⁻⁴	0,242	2.294

40% etüleenglükooli tihedus

$$\rho_{eg} = \frac{1130}{1.0 + 6.67 \cdot 10^{-4} \cdot (T - 273)} \quad [36]$$

Kus:

T – 40% etüleenglükooli keskmine temperatuur K-s

$$\rho_{eg} = \frac{1130}{1.0 + 6.67 \cdot 10^{-4} \cdot (273 - 273)} = 1130 \frac{kg}{m^3}$$

40% etüleenglükooli soojusmahtuvus

$$C_{peg} = 4.47 \cdot (T - 273) + 2290 \quad [36]$$

$$C_{peg} = 4.47 \cdot (273 - 273) + 2290 = 2290 \frac{J}{kg \cdot K}$$

40% etüleenglükooli massikogus

$$G_{eg} = \frac{10 \cdot 1000}{3600} = 2.778 \frac{kg}{s}$$

Soojuskoormus.

$$Q_{kulu} = 2.778 \cdot 2290 \cdot (298 - 278) = 127222 \frac{J}{s} = 127,222 \frac{kJ}{s} = 127,222 W$$

Soojusväljastuse ja soojusülekangetegurite määramine.

Sellele soojuskandja voolurežiimile vastava soojusülekangeteguri ligikaudne väärtus vastavalt tabelile 3.2 on $Kop = 30 W/(m^2 \cdot K)$. Siis on soojusvahetuspinna ligikaudne väärtus.

Tabel 3.2. Soojusülekangetegurite ligikaudsed väärtused, W/(m²·K) [37]

Jrk. nr	Soojusvahetuse tüüp	Sunnitud liikumine	Vaba liikumine
1	Gaasilt gaasile	10 – 40	4 – 12
2	Gaasilt vedelikule	10 – 60	6 – 20
3	Kondenseeruvast aurult gaasile	10 – 60	6 – 12
4	Vedelikult vedelikule:		
	vee jaoks	800 – 1700	140 – 340
	süsivesinikele, õlidele	120 – 270	30 – 60

nr	Soojusvahetuse tüüp	Sunnitud liikumine	Vaba liikumine
5	Kondenseeruvalt veeaurult veele	800 – 3500	300 – 1200
6	Kondenseeruvalt veeaurult orgaanilistele vedelikele	120 – 340	60 – 170
7	Orgaaniliste vedelike kondenseeruvatelt aurudelt veele	300 – 800	230 – 460
8	Kondenseeruvalt veeaurult keevale vedelikele	–	300 – 2500

$$F_{op} = \frac{Q}{K_{op} \cdot \Delta t} = \frac{236211}{30 \cdot (313 - 278)} = 224,962 \text{ m}^2 \quad (2.1)[37]$$

Kus:

F_{op} – soojusvahetuspinnad, m^2

K_{op} – soojusülekannekoefitsient, $\text{W} / (\text{m}^2 \cdot \text{K})$

Lisa 2-st valiti soojusvaheti pinnaga $F_H = 270 \text{ m}^2$, millel on järgmised konstruktsiooniparameetrid:

torude vahelise ruumi pindala = $0,069 \text{ m}^2$;

torude pikkus 6 m;

kesta läbimõõt $D = 800 \text{ mm}$;

torude läbimõõt $20 \times 2 \text{ mm}$;

torude arv $n = 717$;

torukäikude arv $z = 1$;

torude arv ühes käigus $n/z = 717$.

Poolkoksigaasi viskoossus arvutatakse viskoossuse ja iga poolkoksigaasi komponendi mahulise kontsentratsiooni korrutise summast.

$$\mu = \sum \mu_k \cdot y_k$$

Kus:

μ – gaasisegu komponentide soojusjuhtivus, $\text{Pa} \cdot \text{s}$.

$$\mu = 1.2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

4. Soojusülekanne pinna täpsustatud arvutus viiakse läbi järgmiselt.

Leitakse Reynoldsi arv soojusvaheti torude vahelises ruumis

$$Re = \frac{4 \cdot G_1}{\pi \cdot d_B \cdot \left(\frac{n}{z}\right) \cdot \mu_1}$$

kus

$$d_B = d_H - 2 \cdot \delta = 20 - 2 \cdot 2 = 16 \text{ mm}$$

μ – viskoossus, $\text{pa} \cdot \text{s}$

$$Re = \frac{4 \cdot 2.036}{3,14 \cdot 0,016 \cdot 425 \cdot 1,2 \cdot 10^{-5}} = 18275,31$$

Poolkoksigaasi soojusjuhtivus arvutatakse soojusjuhtivuse ja iga poolkoksigaasi komponendi mahulise kontsentratsiooni korrutise summast.

$$\lambda = \sum \lambda_k \cdot y_k$$

Kus:

λ – gaasisegu komponentide soojusjuhtivus, $\text{W} / (\text{m} \cdot \text{K})$.

$$\lambda = 1,6 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$$

Prandtli arv on võrdne:

$$Pr_1 = \frac{c_1 \cdot \mu_1}{\lambda_1} = \frac{3.316 \cdot 1,2 \cdot 10^{-5}}{1,6} = 2,56 \cdot 10^{-5}$$

$$\alpha_1 = \frac{Nu_1 \cdot \lambda_1}{d_3} = \frac{0,021 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \cdot \left(\frac{Pr_1}{Pr_{ct1}}\right) \cdot \lambda_1}{d_3} \quad (2.12)[37]$$

$$= \frac{0,021 \cdot 18275,31^{0,8} \cdot (2,56 \cdot 10^{-5})^{0,4} \cdot 1,622}{0,016} = 78,5 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$$

Antud juhul võib korrektsiooni tähelepanuta jätta, kuna temperatuuri erinevus on väike.

Voolu minimaalne ristlõige torude vahelises ruumis on $S_{m,TP} = 0,040 \text{ m}^2$, seega on selle piirkonna voolurežiimi iseloomustav Reynoldsi arv võrdne

$$Re = \frac{G_2 \cdot d_H}{S_{m,t} \cdot \mu_2} = \frac{2.778 \cdot 0,025}{0,069 \cdot 6,76 \cdot 10^{-5}} = 9525,62$$

ja Prandtli arv:

$$Pr_2 = \frac{c_2 \cdot \mu_2}{\lambda_2} = \frac{2.294 \cdot 6,76 \cdot 10^{-5}}{0,242} = 0,00064$$

$$\alpha_2 = \frac{Nu_2 \cdot \lambda_2}{d_H} = \frac{0,24 \cdot Re^{0,6} \cdot Pr^{0,36} \cdot \lambda_2}{d_H} = \frac{0,24 \cdot 9525,62^{0,6} \cdot 0,00064^{0,36} \cdot 0,242}{0,016} = 62,76 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$$

Soojusvaheti soojusülekande tegur määratakse võrrandiga

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_t} + \frac{\delta_{ct}}{\lambda_{ct}} + 2r_s + \frac{1}{\alpha_x}} \quad (2.10)[37]$$

Kus:

δ_{ct} – toru seina paksus, mis on võrdne 0,002 m;

λ_{ct} – terase soojusjuhtivus, mis on võrdne 40 kcal/ (m · tund °C);

r_s – saastumine mõlemal pool toru seina, mis on võrdne $\frac{1}{10000}$;

$$K = \frac{1}{\frac{1}{78.5} + \frac{0.002}{40} + 2 \cdot \frac{1}{10000} + \frac{1}{62.76}} = 34.58 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

$$F_p = \frac{Q}{K \cdot \Delta t} = \frac{236211}{34.58 \cdot (313 - 278)} = 195.19 m^2$$

5. Valitud soojusvaheti soojusvahetuspinna varu on

$$\Delta = \frac{F_H - F_p}{F_p} \cdot 100\% \quad (2.51)[37]$$

$$\Delta = \frac{270 - 195.19}{195.19} \cdot 100\% = 38.32\%$$

Seega võime järeldada, et soojusvaheti vaadeldav versioon tagab kuubijäägi jahutamiseks ettenähtud töötingimused soojusvahetuspinna varuga 38,32%.

3.4 Gaasikompressori arvutus tagamaks vajalikku rõhku gaasiturbiini suunamiseks

Nõutavad turbiini parameetrid (OPRA – Technical section) 11–16 barg (Lisa 1) – seetõttu tuleb kasutada täiendavat kompressorit. [35]

Kompressori valimiseks peab teadma:

- kompressori võimsust;
- temperatuuri väljumisel.

Arvutame kompressori 2000 m³/tunnis poolkoksigaasi kokkusurumiseks vahemikus 0,2 kuni 11 baari. Arvutusmeetodit rakendati raamatust «примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии».

1. Gaasi temperatuur sisenemisel tööratlasse

$$T_H = 8 \text{ °C} + 273 = 281 \text{ °K}$$

Mooliosad.

$$m = \frac{y_i}{100} * \rho * V$$

$$x = \frac{n_i}{n_{\text{segu}}} = \frac{n_i}{0.008975}$$

Tabel 3.3 Mooliosad

Jrk. nr	Gaasi koostis:	M kg/mol	m kg/h	n kg/mol	x
1	CO2	0,044	372,4	0,000118	0,013164
2	C2H4	0,028	266,2983	0,000105	0,011715
3	C2H6	0,03	222,44	0,000135	0,015027
4	C3H6	0,042	294,408	0,000143	0,015895
5	C3H8	0,044	110,714	0,000397	0,04428
6	C4H8	0,056	133,5	0,000419	0,046737
7	C4H10	0,058	58,016	0,001	0,111388
8	C5H12	0,072	431,48	0,000167	0,018592
9	H2	0,002	25,884	7,73E-05	0,008609
10	N2	0,028	212,25	0,000132	0,014698
11	CH4	0,016	221,472	7,22E-05	0,008049
12	CO	0,028	242	0,000116	0,012891
13	O2	0,032	5,72	0,005594	0,623322
14	H2S	0,034	68,096	0,000499	0,055631

Segu molaarmass

$$M_{\text{segu}} = \sum M_k \cdot x_k = 37.15 \frac{\text{g}}{\text{mol}}$$

Gaasi konstant

$$R_{\text{segu}} = \frac{R_0}{M_{\text{segu}}} = \frac{8.314}{37.15} = 0.224$$

Kus:

R₀ – 8,314 konstant

2. Adiabaadi näitaja

$$k_{\text{segu}} = \sum k_k \cdot x_k = 1.322$$

3. Kokkusurumise aste

$$\pi_k = \frac{p_{\text{lõp}}}{p_{\text{algus}}} = \frac{11}{0,2} = 55$$

4. Isentroopiline surve

$$H_s = \frac{k}{k-1} \cdot R \cdot T_H \cdot \left(\pi_k^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right) = \frac{1.322}{1.322-1} \cdot 0.224 \cdot 281 \cdot \left(55^{\frac{1.322-1}{1.322}} - 1 \right) = 427.25 \text{ kJ/kg}$$

5. Kulunud surve

Arvutuse esialgses etapis võtame kasutegurit = 0,89

$$H_z = C_p \cdot T_1 \cdot \left| \pi_k^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right| / \eta_{\text{m3,k}}^* = 3,316 \cdot 281 \cdot \left| 55^{\frac{1,322-1}{1,322}} - 1 \right| / 0,89 = 1733,38$$

Gaasi kulu

$$G_B = \frac{5500 \cdot 1,332}{3600} = 0,74 \text{ kg/s}$$

6. Gaasi temperatuur kompressiooni lõpus kompressori astmetel.

$$T_k = T_H + \frac{H_z}{\frac{k}{k-1} \cdot R_{\text{segu}}} = 281 + \frac{1733,38}{\frac{1,322}{1,322-1} \cdot 0,224} = 746 \text{ K} = 473 \text{ °C}$$

Vastavalt meetodile «примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии» määrame surve astmete optimaalseks väärtuseks 2. Sama tulemuse saab saavutada, kui määrata rõhu suhe astme kohta, mis on vahemikus 0,2 kuni 11. Määrates $P_{\text{CT}} = 6$.

7. Leiame astmete arvu:

Astmete arv

$$Z_p = \frac{\ln \pi_k}{\ln 6} = \frac{\ln 50}{\ln 6} = 2,267$$

Astmete arvu lähim täisarv $Z_p = 2$

8. Kompressori tarbitav võimsus

$$N_k = G_B \cdot H_s = 0,74 \cdot 427,25 = 316,246 \text{ kW}$$

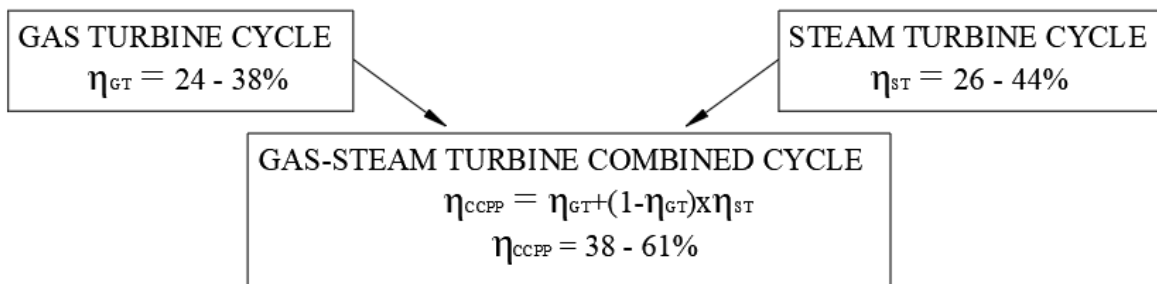
9. Kompressori eritöö

$$I_k = \frac{k}{k-1} \cdot R_{\text{segu}} \cdot T_H \cdot \left(\pi_k^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right) = \frac{1,322}{1,322-1} \cdot 0,224 \cdot 281 \cdot \left(55^{\frac{1,322-1}{1,322}} - 1 \right) = 4227,25 \text{ kJ/kg}$$

Arvutatud parameetrite järgi saab valmistada ette päringu ettevõttele esitamiseks, näiteks: Adicomp.

3.5 Elektri jaamade moderniseerimise otstarbekuse majanduslikud hinnangud, võttes arvesse efektiivsuse (kasutegur) suurendamise saavutatavat taset.

Gaasiturbiini peamine eelis on kombineeritud auru-gaasitsükli korraldamine elektrienergia tootmiseks. Kombineeritud tsükli kasutegur on kõrgem kui ainult Rankine'i aurutsükli, seega toodetakse sama koguse gaasi põletamisel rohkem elektrienergiat. Turbiinide kasuteguri parameetrid ja summaarse kasuteguri arvutamine on näidatud joonisel 3.6.



Joonis 3.6. Kasuteguri arvutus [34]

Mittestandardse kütuseliigi turbiini passist võtame gaasiturbiini kasuteguri välisõhu temperatuuri vahemikus miinus 5 kraadi kuni miinus 10 C° = 26,7%, mis kuulub gaasiturbiini tsükli kasuteguri arvutamise teoreetilisse vahemiku. Gaasiturbiini heitsoojus utiliseeritakse olemasolevas aurukatlas. Väljuvate gaaside temperatuur pärast aurukatelt on tavaliselt vastavalt umbes 200 C°, gaasiturbiini heitsoojuse utiliseerimine vahemikus 580 kuni 200 C on umbes 67%.

Rankine aurujõutsükli kasutegur 36 baari auru jaoks kondensaatoris, kus temperatuur on 440 C ja aururõhk 0,05 baari = 37,6%, mis kuulub aurujõutsükli kasuteguri arvutamise teoreetilisse vahemiku.

Kombineeritud aurugaasitsükli kasutegur leitakse joonisel 3.6 toodud valemist, mis on järgmine:

$$\eta_{CCP} = 0.267 + (1 - 0.267) \cdot 0.67 \cdot 0.376 = 0.451 \text{ или } 45,1\%$$

Kui gaasiturbiini suunata poolkoksigaas soojusvõimsusega 19 MWth, siis elektritootmise kasv jaamas suureneb:

$$19 \cdot 0.144 = 2736 \text{ MW}$$

2023. aastaks on konkurentsiamet ajutiselt kokku leppinud universaalteenuse raames elektritootmise maksumuseks 154,08 eurot megavatt-tunni kohta. Sel juhul on elektrienergia müügitulu keskmiselt aurukatlagas gaasiturbiini tööajast.

$$7000 \frac{\text{tund}}{\text{aasta}} = 2.736 \cdot 154 \cdot 7000 = 2\,949\,408 \text{ euro aasta}$$

KOKKUVÕTE

Eesti energiapoliitika eesmärgiks on energiaressursside ja tööstuse potentsiaali võimalikult tõhus kasutamine jätkusuutlikuks majanduskasvuks, seega on energiateema aktuaalsus täna prioriteetne suund. Elektri- ja soojusenergia tootmise kasutuselevõtt kombineeritud tsükli põhimõttel suurendab elektrijaamade eritootlikkust ja tööparameetrite paindlikkust ning ilma selle soojusvõimsuse vastava suurenemiseta.

Töö käigus teostati lisaks elektri- ja soojusenergia tootmise teoreetiliste aluste kirjeldamisele:

1. kombineeritud tsükli tehnoloogiline skeem VKG ENERGIA OÜ jaoks olemasoleva keskrõhukatlamaja baasil (katel BKZ 75-39 + auruturbiin);
2. poolkoksigaasi põletamiseks mõeldud gaasiturbiini perspektiivse mudeli kindlaksmääramine. Lõputöös valiti välja ettevõtte OPRA Turbines BV (Holland) toodetud OP16 turbiin võimsusega 1,85 MW;
3. soojusvaheti arvutus ühe Petroteri tehase poolkoksigaasi ettevalmistamiseks gaasiturbiini suunamiseks. Määratud kest-toru soojusvaheti, esmane jahutus kesta läbimõõdu 800 mm, torude arvu 717, torude pikkuse 6 m, soojusvahetuse pinna 507 m^2 , kahekäiguline ja vaheseinte vahelise kaugusega 520 mm;
4. arvutatud gaasikompressor tagamaks vajalikku rõhku gaasiturbiini suunamiseks. Määratud tsentrifugaalkompressor võimsusega 316.246 kW, kahe kokkusurumise astmega, gaasi temperatuur väljumisel on 473 °C;
5. Teostatud elektrijaamade moderniseerimise otstarbekuse majanduslik hinnang, võttes arvesse efektiivsuse (kasutegur) suurendamise saavutatavat taset. Kinnitatud kombineeritud tsükliga seadme majanduslik otstarbekus kuni 45,1% (hetkel aurrežiimil 37,6%).

SUMMARY

Oil shale is considered to be the main mineral that is used as a raw material in industrial enterprises such as Viru Keemia Grupp (VKG), Enefit Power AS, Kiviõli Keemiatööstus (KKT). The main goal of thermal technologies for processing oil shale is to obtain products in the form of liquid shale oils. The semi-coke gas formed during heat treatment acts as a by-product, which is a valuable chemical raw material containing a large amount of hydrocarbons, which is a high-calorie fuel used for boilers and process furnaces as a fuel for boilers.

Currently, shale gas (semi-coke gas) is supplied to a power plant, where it is burned in steam boilers to produce electricity and high-pressure steam. The efficiency of a power plant using only steam boilers to generate electricity is in the range of 26–44%. To increase the efficiency of power generation, it is proposed to use a combined cycle using pore turbines together with a gas turbine, which can increase the efficiency of power generation in the range of 38–61%. In addition to generating electricity, the water obtained from steam boilers can be used for heating.

The purpose of this work is to show the theoretical possibility of using a combined cycle of production using combined cycle plants at an enterprise to generate electricity and heat using semi-coke gas. The relevance of the topic lies in the fact that the goal of Estonian energy policy is the most efficient use of energy resources and the potential of industries for the sustainable growth of economies, therefore the relevance of the energy issue at the moment is a priority. The introduction of technologies such as combined cycle evades energy generation and increases the priority of using non-design fuels such as semi-coke gas obtained from oil shale processing at Petroter and Enefit units.

KASUTATUD KIRJANDUS

1. Использование и переработка сланцевого сырья. [online]
<https://magazine.nftegaz.ru/articles/pererabotka/689088-ispolzovanie-i-pererabotka-slantsevogo-syrya/> (08.03.2023)
2. Производство на ККТ. [online]
<https://www.keemiatoostus.ee/ru/%d0%bf%d1%80%d0%be%d0%b8%d0%b7%d0%b2%d0%be%d0%b4%d1%81%d1%82%d0%b2%d0%be/> (08.03.2023)
3. Згуро А., Григорьева Л., С. Чекрыжов С., Бородина И. Химические технологии: учебное пособие для химико-технологических специальностей профессиональных центров. Йыхви: Innove, 2012
4. Диссертационная работа Сидоркина В.Т. на соискание ученой степени кандидата технических наук на тему "Повышение эффективности сжигания побочных газообразных продуктов сланцепереработки в котлах ТЭС", 2016
5. Перспективы энергетического использования белорусских горючих. [online]
<https://rep.bntu.by/bitstream/handle/data/7842/%D0%A1.%2086-93.pdf?sequence=1&isAllowed=y> (15.03.2023)
6. Thermodynamic cycle. [online]
https://energyeducation.ca/encyclopedia/Thermodynamic_cycle (15.03.2023)
7. Brayton Cycle. [online] (15.03.2023)
[https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Physical_and_Theoretical_Chemistry_Textbook_Maps/Supplemental_Modules_\(Physical_and_Theoretical_Chemistry\)/Thermodynamics/Thermodynamic_Cycles/Brayton_Cycle#:~:text=The%20Brayton%20Cycle%20is%20a,vehicles%20by%20giving%20them%20thrust.](https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Physical_and_Theoretical_Chemistry_Textbook_Maps/Supplemental_Modules_(Physical_and_Theoretical_Chemistry)/Thermodynamics/Thermodynamic_Cycles/Brayton_Cycle#:~:text=The%20Brayton%20Cycle%20is%20a,vehicles%20by%20giving%20them%20thrust.)
8. 5.1: Carnot Cycle. [online]
[https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Physical_and_Theoretical_Chemistry_Textbook_Maps/The_Live_Textbook_of_Physical_Chemistry_\(Peverati\)/05%3A_Thermodynamic_Cycles/5.01%3A_Carnot_Cycle](https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Physical_and_Theoretical_Chemistry_Textbook_Maps/The_Live_Textbook_of_Physical_Chemistry_(Peverati)/05%3A_Thermodynamic_Cycles/5.01%3A_Carnot_Cycle) (15.03.2023)
9. Carnot Cycle – Thermodynamics of Carnot Engine | Theorem, Explanation & Limitation. [online] <https://www.eigenplus.com/carnot-cycle-thermodynamics-of-carnot-engine/> (16.03.2023)
10. Combined cycle plant for power generation: Introduction. [online]
<https://www.wartsila.com/energy/learn-more/technical-comparisons/combined-cycle-plant-for-power-generation-introduction> (16.03.2023)

11. Rankine cycle. [online] <https://www.thermopedia.com/content/1072/> (16.03.2023)
12. Е. В. Цветова. Технология производства электроэнергии и тепла, Практикум, 2020
13. Combined Heat and Power Technology Fact Sheet Series. [online] <https://www.energy.gov/eere/amo/articles/steam-turbines-doe-chp-technology-fact-sheet-series-fact-sheet-2016> (18.03.2023)
14. Паротурбинная установка. [online] <https://studfile.net/preview/7513603/page:13/> (18.03.2023)
15. Константин Берсенеv. Исследование особенностей технологий сжигания газообразных продуктов сланцепереработки, 2010
16. Mis on põlevkivi? [online] <https://taltech.ee/polevkivi-kompetentsikeskus-polevkivist> (19.03.2023)
17. What is a gas turbine, and how does it work? [online] <https://www.ge.com/gas-power/resources/education/what-is-a-gas-turbine> (19.03.2023)
18. Gas turbine. [online] https://energyeducation.ca/encyclopedia/Gas_turbine (19.03.2023)
19. Gas Turbines: Definition, Applications, Working, Components, Types, Design, Advantages (PDF). [online] https://whatispiping.com/gas-turbines/?utm_content=cmp-true (20.03.2023)
20. Difference between Open Cycle Gas Turbine and Closed Cycle Gas Turbine. [online] <https://www.tutorialspoint.com/difference-between-open-cycle-gas-turbine-and-closed-cycle-gas-turbine#:~:text=In%20an%20open%20cycle%20gas%20turbine%2C%20the%20gas%20after%20rotating,passes%20into%20the%20cooling%20chamber.> (22.03.2023)
21. Журнал научных публикаций «Наука через призму времени». [online] <http://www.naupri.ru/journal/2192> (22.03.2023)
22. Парогазовая электростанция (ПГЭС). [online] <https://neftegaz.ru/tech-library/elektrostantsii/141631-parogazovaya-elektrostantsiya-pges/> (24.03.2023)
23. Carnot Cycle. [online] [https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Physical_and_Theoretical_Chemistry_Textbook_Maps/Supplemental_Modules_\(Physical_and_Theoretical_Chemistry\)/Thermodynamics/Thermodynamic_Cycles/Carnot_Cycle](https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Physical_and_Theoretical_Chemistry_Textbook_Maps/Supplemental_Modules_(Physical_and_Theoretical_Chemistry)/Thermodynamics/Thermodynamic_Cycles/Carnot_Cycle) (24.03.2023)
24. Rankine. [online] https://energyeducation.ca/encyclopedia/Rankine_cycle#:~:text=This%20proces

s%20was%20developed%20in,into%20electricity%20by%20electrical%20generation.
(26.03.2023)

25. Общая энергетика: Тепловые, атомные, гидравлические электрические станции, газотурбинные и парогазовые силовые установки, распределение электрических нагрузок. [online]
<https://www.brizmotors.ru/useful/article/obshchaya-energetika-teplovye-atomnye-gidravlicheskie-elektricheskie-stantsii-gazoturbinnye-i-paroga/> (01.04.2023)

26. Способы получения электроэнергии: где мир берет силы для развития. [online]
<https://plus-one.ru/manual/2022/04/14/sposoby-polucheniya-elektroenergii>
(02.04.2023)

27. Types of Steam Turbine: An easy-to-understand and practical Classification. [online]
https://www.linquip.com/blog/types-of-steam-turbine/#Types_of_Steam_Turbines
(03.04.2023)

28. Gas Turbine Power Plant – Layout & Schematic Diagram. [online]
<https://www.electricalengineeringinfo.com/2014/12/gas-turbine-power-plant-or-gas-power-station-layout.html> (06.04.2023)

29. Н. Б. Варгафтик. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. 1972

30. Eesti Keemiatööstuse Liit. Eesti Põlevkiviõli tootmise parim võimalik tehnika, 2013

31. А. Н. Тугова, А. Отс, А. Сийрде, В. Т. Сидоркинс, Г. А. Рябов. Разработка мероприятий по усовершенствованию технологий энергетической утилизации гаццообоазных отходов сланцепереработки, 2016.

32. Расчёт показателей экономических газотурбинных и парогазовых установок. [online]
https://portal.tpu.ru/SHARED/n/NASA/Education/ptu/Tab1/mu_pgu.pdf
(15.05.2023)

33. Opra turbines. Budget quotation -technical selection- for ENTEH (Estonia). 2012

34. V. Sidorkin, A. Truhniy, G. Olhovskiy, A. Tugov. Application of gas turbine technologies for the utilization of gaseous by-products of oil shale thermal processing. 2013

35. Opra turbines. [online] <https://www.destinus.energy/?r=1> (15.05.2023)

36. Физические свойства этиленгликоля и глицерина. [online]
https://www.highexpert.ru/content/liquids/eg_gl.html (15.05.2023)

37. А.М.Конахин, И.А.Конахина. Расчет теплообменных аппаратов. 2006

38. К. Ф. Павлов, П. Г. Романков, А. А. Носков. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии. 1987

39. Gas Turbine Power Plant and Types of Gas Turbine. [online]
<https://www.electronicclinic.com/gas-turbine-power-plant-and-types-of-gas-turbine/>
(15.05.2023)

40. Combined-cycle generation. [online]
<http://www.pandafunds.com/generate/electricity-generation/combined-cycle-generation/> (15.05.2023)

OP16 Gas Turbine

Performance at ISO Conditions*

OP16 Gas Turbine Genset	SI IMPERIAL	SI IMPERIAL
Power Output (p.f.=1)	kWe	1883
Electrical Efficiency (p.f.=1)	%	25.0
Maximum Total Efficiency	%	>90
Availability	%	>98
Fuel Consumption	Nm ³ /h MMBtu/h	864 25.7
Heat Rate (p.f.=1)	kJ/kWh Btu/kWh	14413 13661
Exhaust Gas Flow	kg/s lb/s	9.0 19.8
Exhaust Gas Temperature	°C °F	573 1064
Pressure Ratio	-	6.71
Required Inlet Gas Pressure**	barg psig	11-16 159-232
Generator Voltage	kV	0.4 - 13.8
Frequency	Hz	50/60
Time Between Major Overhaul	Hours	42,500

* Data based on natural gas fuel (LHV:38 MJ/kg). Multiple fuels possible. ** The minimum inlet gas pressure depends on the fuel composition and operating conditions.



www.opra.energy



Lisa 2 Kest-toru jahutite parameetrid vastavalt ГOCT 15118-79, ГOCT 15120-79 ja ГOCT 15122-79 [37]

Kesta läbimõõt, mm	Torude läbimõõt, mm	Käikude arv	Torude üldarv	Soojusvahetuse pind m ² , kui torude pikkus on, m							Kõige kitsama voolu ristlõike pindala torudevahelises ruumis, m ²	Ühe torude käigu ristlõike pindala, m ²
				1,0	1,5	2,0	3,0	4,0	6,0	9,0		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
159	20×2	1	19	1,0	2,0	2,5	3,5	--	--	--	0,003	0,004
	25×2	1	13	1,0	1,5	2,0	3,0	--	--	--	0,004	0,005
273	20×2	1	61	4,0	6,0	7,5	11,5	--	--	--	0,007	0,012
	25×2	1	37	3,0	4,5	6,0	9,0	--	--	--	0,009	0,013
325	20×2	1	100	--	9,5	12,5	19,0	25,0	--	--	0,011	0,020
		2	90	--	8,5	11,0	17,0	22,5	--	--	0,011	0,009
	25×2	1	62	--	7,5	10,0	14,5	19,5	--	--	0,013	0,021
		2	56	--	6,5	9,0	13,0	17,5	--	--	0,013	0,010
400	20×2	1	181	--	--	23,0	34,0	46,0	68,0	--	0,017	0,036
		2	166	--	--	21,0	31,0	42,0	63,0	--	0,017	0,017
	25×2	1	111	--	--	17,0	26,0	35,0	52,0	--	0,020	0,038
		2	100	--	--	16,0	24,0	31,0	47,0	--	0,020	0,017
600	20×2	1	389	--	--	49	73	98	147	--	0,041	0,078
		2	370	--	--	47	70	93	139	--	0,041	0,037
		4	334	--	--	42	63	84	126	--	0,041	0,016
		6	316	--	--	40	60	79	119	--	0,037	0,009
	25×2	1	257	--	--	40	61	81	121	--	0,040	0,089
		2	240	--	--	38	57	75	113	--	0,040	0,042
		4	206	--	--	32	49	65	97	--	0,040	0,018
		6	196	--	--	31	46	61	91	--	0,037	0,011
Kesta läbimõõt,		Käikude arv	Torude üldarv	Soojusvahetuse pind m ² , kui torude pikkus on, m							Kõige kitsama voolu ristlõike	Ühe torude käigu

mm	Torude läbimõõt, mm			1,0	1,5	2,0	3,0	4,0	6,0	9,0	pindala torudevahelises ruumis, m ²	ristlõike pindala, m ²
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
800	20×2	1	717	--	--	90	135	180	270	405	0,069	0,144
		2	690	--	--	87	130	173	260	390	0,069	0,069
		4	638	--	--	80	120	160	240	361	0,069	0,030
		6	618	--	--	78	116	155	233	349	0,065	0,020
	25×2	1	465	--	--	73	109	146	219	329	0,070	0,161
		2	442	--	--	69	104	139	208	312	0,070	0,077
		4	404	--	--	63	95	127	190	285	0,070	0,030
		6	385	--	--	60	90	121	181	271	0,065	0,022
1000	20×2	1	1173	--	--	--	221	295	442	663	0,101	0,236
		2	1138	--	--	--	214	286	429	643	0,101	0,114
		4	1072	--	--	--	202	269	404	606	0,101	0,051
		6	1044	--	--	--	197	262	393	590	0,096	0,034
	25×2	1	747	--	--	--	176	235	352	528	0,106	0,259
		2	718	--	--	--	169	226	338	507	0,106	0,124
		4	666	--	--	--	157	209	314	471	0,106	0,124
		6	642	--	--	--	151	202	302	454	0,102	0,036
1200	20×2	1	1701	--	--	--	151	427	641	961	0,145	0,342
		2	1658	--	--	--	--	417	625	937	0,145	0,165
		4	1580	--	--	--	--	397	595	893	0,145	0,079
		6	1544	--	--	--	--	388	582	873	0,131	0,049
	25×2	1	1083	--	--	--	--	340	510	765	0,164	0,375
		2	1048	--	--	--	--	329	494	740	0,164	0,179
		4	986	--	--	--	--	310	464	697	0,164	0,084

Kesta läbimõõt, mm	Torude läbimõõt, mm	Käikude arv	Torude üldarv	Soojusvahetuse pind m ² , kui torude pikkus on, m							Kõige kitsama voolu ristlõike pindala torudevahelises ruumis, m ²	Ühe torude käigu ristlõike pindala, m ²
				1,0	1,5	2,0	3,0	4,0	6,0	9,0		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1200	25x2	6	958	--	--	--	--	301	451	677	0,142	0,052