

Торайғыров университетінің хабаршысы
ҒЫЛЫМИ ЖУРНАЛЫ

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
Вестник Торайғыров университета

Торайғыров университетінің ХАБАРШЫСЫ

Энергетикалық сериясы
1997 жылдан бастап шығады



ВЕСТНИК Торайғыров университета

Энергетическая серия
Издается с 1997 года

ISSN 2710-3420

№ 4 (2025)

ПАВЛОДАР

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
Вестник Торайгыров университета

Энергетическая серия
выходит 4 раза в год

СВИДЕТЕЛЬСТВО

о постановке на переучет периодического печатного издания,
информационного агентства и сетевого издания

№ 14310-Ж

выдано

Министерство информации и общественного развития
Республики Казахстан

Тематическая направленность

публикация материалов в области электроэнергетики,
электротехнологии, автоматизации, автоматизированных и
информационных систем, электромеханики и теплоэнергетики

Подписной индекс – 76136

<https://doi.org/10.48081/GMYR4462>

Бас редакторы – главный редактор

Талипов О. М.

доктор PhD, ассоц. профессор (доцент)

Заместитель главного редактора

Калтаев А.Г., *доктор PhD*

Ответственный секретарь

Сағындық Ә.Б., *доктор PhD*

Редакция алқасы – Редакционная коллегия

Клецель М. Я.,	<i>д.т.н., профессор</i>
Никифоров А. С.,	<i>д.т.н., профессор</i>
Новожилов А. Н.,	<i>д.т.н., профессор</i>
Никитин К. И.,	<i>д.т.н., профессор (Российская Федерация)</i>
Алиферов А. И.,	<i>д.т.н., профессор (Российская Федерация)</i>
Кошеков К. Т.,	<i>д.т.н., профессор</i>
Приходько Е. В.,	<i>к.т.н., профессор</i>
Кислов А. П.,	<i>к.т.н., доцент</i>
Нефтисов А. В.,	<i>доктор PhD</i>
Шокубаева З. Ж.	<i>технический редактор</i>

За достоверность материалов и рекламы ответственность несут авторы и рекламодатели

Редакция оставляет за собой право на отклонение материалов

При использовании материалов журнала ссылка на «Вестник Торайгыров университета» обязательна

© Торайгыров университет

**А. Т. Досанова¹, М. С. Исатаев²,
Б. Онгар³, *Ж. С. Дүйсенбек⁴**

^{1,2}Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті,

Қазақстан Республикасы, Алматы қ.

³Қ. И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық зерттеу техникалық университеті,
Қазақстан Республикасы, Алматы қ.

⁴Ғ. Даукеев атындағы Алматы энергетика және байланыс университеті,
Қазақстан Республикасы, Алматы қ.

¹ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-4046-6603>

²ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8248-670X>

³ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8333-8343>

⁴ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7844-4240>

*e-mail: zhaniko.adina@mail.ru

ЖОҒАРЫ КРИТИКАЛЫҚ БУ ГЕНЕРАТОРЛАРЫНЫҢ ТЕРМОДИНАМИКАЛЫҚ ЦИКЛДЕРІН ОҒТАЙЛАНДЫРУ

Бұл мақалада жоғары критикалық бу генераторларының термодинамикалық циклдерін оңтайландыру мәселелері жан-жақты қарастырылады. Қазіргі энергетика саласында жоғары қысым мен температура аймағында жұмыс істейтін бу-энергетикалық қондырғылардың тиімділігін арттыру – энергия үнемдеу мен экологиялық тұрақтылықты қамтамасыз етудің негізгі бағыты болып табылады. Зерттеу барысында Ренкин циклі негізіндегі супер-критикалық және ультра-супер-критикалық режимдердегі бу генерациясының термодинамикалық параметрлері талданып, олардың энергетикалық және эксергетикалық көрсеткіштері салыстырылды.

Оңтайландыру мақсатында регенеративтік жылу алмасу жүйелері, аралық қайнау процестері және эксергетикалық талдау әдістері қолданылды. Бұл тәсілдер бу генераторларының пайдалы әсер коэффициентін (ПӘК) арттыруға, жылу шығындарын азайтуға және отынның тиімді пайдаланылуын қамтамасыз етуге мүмкіндік береді. Сонымен қатар, зерттеу нәтижелері жылу балансының сапасын жақсартуға және парогенерация жүйелерінің тұрақты жұмысын қамтамасыз етуге бағытталған.

Теориялық есептеулер нақты өндірістік параметрлермен салыстырылып, жоғары критикалық бу генераторларын жобалау мен жаңғыртудың тиімді жолдары көрсетілді. Мақала энергетикалық қондырғылардың тиімділігін арттыру бойынша практикалық ұсыныстар ұсына отырып, заманауи энергетика үшін ғылыми және инженерлік тұрғыдан маңызды үлес қосады.

Бұл зерттеу нәтижелері жоғары критикалық бу генераторларының болашақ даму бағыттарын айқындап, энергия тиімділігі жоғары әрі экологиялық тұрғыдан таза энергетикалық жүйелерді жобалауға ғылыми негіз қалайды.

Кілтті сөздер: бу генераторы, термодинамикалық цикл, энергетикалық тиімділік, оңтайландыру, регенерация, аралық қайнау, бу турбинасы.

Кіріспе

Қазіргі таңда әлемдік энергетика саласында энергия өндірудің тиімділігін арттыру, отын шығынын азайту және қоршаған ортаға әсерін төмендету мәселелері алдыңғы орынға шықты. Соның ішінде, жоғары критикалық және ультра-жоғары критикалық параметрлермен жұмыс істейтін бу генераторлары дәстүрлі бу-турбиналық технологиялардың орнына кеңінен қолданылып келеді. Бұл қондырғылар жоғары қысымда (25 МПа-дан жоғары) және жоғары температурада (600 °C және одан жоғары) жұмыс істеу арқылы бу айналымының пайдалы әсер коэффициентін (ПӨК) едәуір арттырады.

Термодинамикалық циклдерді оңтайландыру – жоғары критикалық бу генераторларының өнімділігі мен сенімділігін қамтамасыз етудің негізгі жолдарының бірі болып табылады. Атап айтқанда, Ренкин циклі, аралық қайнау (reheat) және регенерация сияқты технологиялар термодинамикалық тиімділікті арттыруда кеңінен қолданылады. Бұл тәсілдер жылулық және эксергетикалық шығындарды азайтуға, сонымен қатар құрылғының ұзақ мерзімді жұмысын қамтамасыз етуге мүмкіндік береді [1].

Мақаланың негізгі мақсаты – жоғары критикалық бу генераторларының термодинамикалық циклдерін талдау және оңтайландыру арқылы олардың энергетикалық тиімділігін арттыру. Сонымен қатар, әртүрлі цикл конфигурацияларын салыстыру арқылы ПӨК-ті арттыруға әсер ететін негізгі факторларды анықтау көзделеді.

Зерттеу аясында алғаш рет:

– Жоғары критикалық параметрлердегі Ренкин циклінің эксергетикалық және энергия балансының нақты салыстырмалы талдауы жүргізілді;

– Оңтайлы жұмыс қысымы мен температурасы үшін жылу балансының тиімді конфигурациясы ұсынылды;

Бу генераторының жалпы энергетикалық тиімділігін арттыруға бағытталған жобалық шешімдер негізделді.

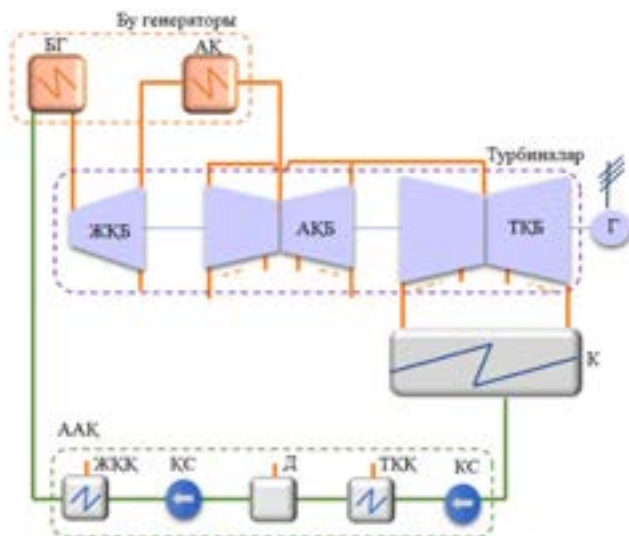
Материалдар мен әдістері

Бұл зерттеуде жоғары критикалық бу генераторларының термодинамикалық циклдерін талдау және оңтайландыру мақсатында теориялық модельдеу, термодинамикалық есептеулер және эксергетикалық талдау әдістері қолданылды. Жоғары критикалық параметрлермен ($p > 22,1$ МПа, $T > 374$ °C) жұмыс істейтін Ренкин циклі негізіндегі бу генераторы алынды. Сонымен қатар, жүйеде бір сатылы және екі сатылы аралық қайнау, регенеративті жылу алмастырғыштар (жылу алым пункттері) қарастырылды.

Есептеу жұмыстары үшін стандартты су-бу фазалық диаграммасы, I-s (энтальпия–энтропия) және T-s (температура–энтропия) диаграммалары қолданылды.

Зерттеліп отырған цикл - Ренкин цикліне негізделген, алайда ол жоғары қысым ($p > 22,1$ МПа) және жоғары температура ($T > 540-600$ °C) жағдайында жұмыс істейді. Мұндай параметрлер су буының критикалық нүктесінен жоғары болғандықтан, бу генераторы аса критикалық аймақта жұмыс істейді. Бұл өз кезегінде пайдалы әсер коэффициентін (ПӘК) арттыруға және отын шығынын азайтуға мүмкіндік береді [2].

Жоғары немесе аса критикалық бу параметрлерімен жұмыс істейтін бу-турбиналық қондырғының термодинамикалық циклінің толық сұлбасы. Мұндай циклдер жылу электр станцияларында қолданылады және энергия тиімділігі жоғары жүйелер болып саналады (1-сурет).



1-сурет – Бір рет қыздыратын суперкритикалық бу жылу электр станцияларының термодинамикалық циклінің конфигурациялары:

БГ – бу генераторы, АҚ – аралық қыздырғыш, ЖҚБ – жоғарғы қысымды бу, АҚБ – аралық қысымды бу, ТҚБ – төменгі қысымды бу, Г – генератор, К – конденсатор, КС – конденсат сорғы, ТҚК – төмен қысымды қыздырғыш, Д – деаэратор, ҚС – коректендіру сорғысы, ЖҚК – жоғарғы қысымды қыздырғыш, ААҚ – алдын ала қыздырғыш

Бұл цикл – жоғары тиімді, инженерлік тұрғыдан оңтайландырылған және энергия үнемдеуге бейімделген жылу электр станциясының үлгісі болып табылады. Жүйеде аралық қыздыру мен регенерацияны біріктіру арқылы жылу шығынын азайтуға және пайдалы әсер коэффициентін 45–50 % деңгейіне дейін жеткізуге болады (1-кесте).

Бір рет қыздырылатын суперкритикалық бу электр станциялары – заманауи энергетикада жиі қолданылатын, жоғары ПӘК-ке ие, бірақ қарапайым құрылыммен ерекшеленетін шешім. Аталған цикл термодинамикалық және инженерлік тұрғыдан оңтайлы таңдау бола алады, әсіресе инвестициялық шектеулері бар аймақтарда немесе техникалық күрделілікті төмендету қажет болғанда [3];[4].

I-кесте – Негізгі ерекшеліктері

Параметр	Маңыздылығы
Қысым	22,1–25 МПа (суперкритикалық)
Температура	540–600 °C
Қыздыру саны	1 рет қыздыру
Турбина	Бір немесе көп сатылы, бірақ аралық қайта қыздырусыз
ПӨК (η)	40–42 % аралығында (аралық қыздырусыз)
Цикл түрі	Жабық Ренкин циклі
Аса критикалық бу	Жоғары қысым мен температура – жоғары ПӨК
Аралық қыздыру	Бу температурасын қалпына келтіру - тиімділік артады
Регенеративті қыздыру	Қайта пайдаланылған жылу – отын үнемделеді
Деаэратор	Қауіпсіздік және ұзақ жұмыс мерзімі
Үш сатылы турбина	Жылу энергиясын кезең-кезеңімен пайдалы жұмысқа айналдыру

Математикалық модельдеу

Термодинамикалық циклдің тиімділігі – бұл жүйенің жылу энергиясын механикалық немесе электр энергиясына айналдыру қабілетін сипаттайтын негізгі көрсеткіш. Жылу электр станцияларында (ЖЭС) бұл тиімділік көрсеткіштері пайдалы әсер коэффициенті (ПӨК), эксергетикалық тиімділік, спецификалық отын шығыны, және жылу қолдану коэффициенті сияқты бірнеше параметрлер арқылы бағаланады.

Пайдалы әсер коэффициенті (термодинамикалық) – жүйенің жылу энергиясын қаншалықты тиімді механикалық (немесе электр) энергияға айналдыратынын көрсетеді:

$$\eta = \frac{W_{\text{полезн}}}{Q_{\text{сгртн}}} \quad (1)$$

мұндағы, $W_{\text{ген}}$ – циклден алынған таза (нетто) механикалық немесе электр жұмысы;

$Q_{\text{жүк}}$ – циклге сырттан енгізілген жылу мөлшері.

Егер турбина бір сатылы болса:

$$W_{\text{тур}} = h_1 - h_2 \quad (2)$$

мұндағы, h_1 – турбина кірісіндегі энтальпия (қазандықтан шыққан бу), кДж/кг;

h_2 – турбина шығысындағы бу энтальпиясы, кДж/кг.

Суперкритикалық станциялар – бұл бу қысымы мен температурасы су мен будың фазалық ауысуы болмайтын критикалық нүктеден жоғары болатын режимде жұмыс істейтін заманауи жылу электр станциялары [5]; [6]; [7].

$$I_{\text{нагр}} = \frac{(C_{\text{вод}} + C_{\text{мет}}) \cdot k}{W_{\text{нагр}}} \quad (3)$$

мұндағы, $C_{\text{нег}}$ және $C_{\text{элек}}$ – сәйкесінше тенге/кВт-тағы негізгі жабдықтың және электр жабдықтарының шығындары;

k – басқа шығындарды есепке алу үшін қолданылатын көбейткіш коэффициент.

Негізгі бу шығынының меншікті таза жылдамдығы, кг/кВтсағ:

$$d_{\text{нагр}} = \frac{3600 \cdot F_{\text{бу, макс}}}{W_{\text{нагр}}} \quad (4)$$

мұндағы, $F_{\text{бу, макс}}$ – негізгі бу массасының шығыны, кг/с.

Меншікті таза энергия, кДж/кг:

$$e_{\text{нагр}} = \frac{3600}{d_{\text{нагр}}} \quad (5)$$

Бу электр станциясының әрбір құрамдас бөлігі (қазандық, турбина, конденсатор, сорғы, қыздырғыш және т.б.) үшін басқарушы теңдеулер жылу динамикасының негізгі заңдарына сүйенеді [8]. Бұл теңдеулер Моран мен Шапиро еңбектерінде егжей-тегжейлі берілген.

$$\Sigma_i \cdot m_i = \Sigma_e \cdot m_e \quad (6)$$

$$Q_{cv} + \Sigma_i \cdot m_i \cdot \left(h_i + \frac{v_i^2}{2} + z_i \cdot g \right) = W_{cv} + \Sigma_e \cdot m_e \cdot \left(h_e + \frac{v_e^2}{2} + z_e \cdot g \right) \quad (7)$$

$$\Sigma_j \cdot \left(1 - \frac{T_j}{T_j} \right) \cdot Q_{cv} + \Sigma_i \cdot m_i \cdot e_{fi} = W_{cv} + \Sigma_e \cdot m_e \cdot e_{fe} + E_d \quad (8)$$

мұндағы, e_f – ағынның ерекше эксергиясы, ол келесідей анықталады:

$$e_f = (h - h_s) + T \cdot (s - s_0) + \frac{v^2}{2} + gz \quad (9)$$

Циклдің барлық құрамдас бөліктерінде кинетикалық және потенциалдық энергия өзгерістерін елемуге болады.

Нәтижелер және талқылау

Суперкритикалық, ультра суперкритикалық және жетілдірілген ультра суперкритикалық электр станцияларының жұмыс шарттары Үндістан үкіметінің электр энергетикасы жөніндегі орталық органы шығарған ұлттық электр жоспарынан алынған. Осы зерттеу үшін қарастырылатын жұмыс параметрлерінің ауқымы төмендегі кестеде келтірілген (2-кесте).

2-кесте – Цифрлы сенсорлар арқылы жиналған мәліметтер

Технология	Турбинаның кіріс қысымы	Турбинаның кіріс температурасы
Суперкритикалық (СК) электр станциясы	221 бардан 250 барға дейін	500 °C пен 600 °C
Ультра суперкритикалық (УСК) қуат	251 бардан 300 барға дейін	550 °C пен 700 °C
Жетілдірілген ультра суперкритикалық (ЖУСК) қуат	301 бардан 350 барға дейін	700 °C пен 800 °C

Суперкритикалық электр станциясының сценарийі үшін электр станциясының имитацияланған моделі 0,1-ден 0,5-ке дейінгі әртүрлі қысым коэффициенттерімен орындалды.

Суперкритикалық бу параметрлері бар электр станциясының жұмыс режимдерін зерттеу мақсатында, сандық имитациялық модель құрылды. Бұл модель негізінде электр станциясының негізгі термодинамикалық элементтері (қазандық, турбина, конденсатор және т.б.) үшін энергия және масса баланстары құрылып, MATLAB/Simulink ортасында іске асырылды (2-сурет).

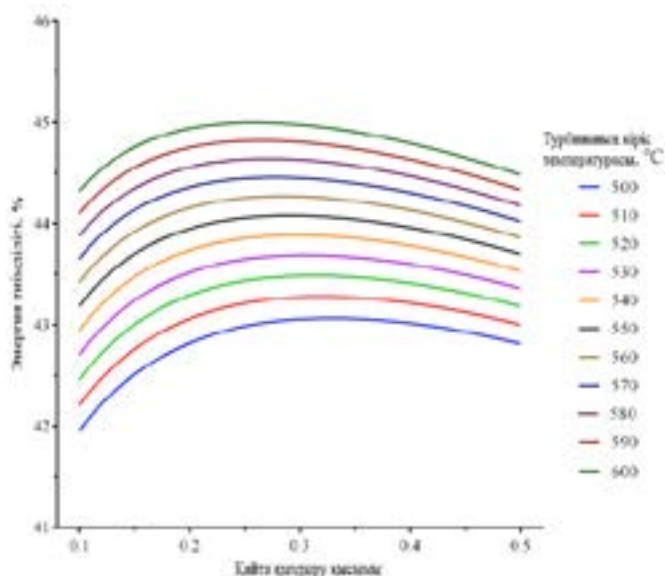
Зерттеу барысында қысым коэффициенті деп аталған параметрдің мәні 0.1–0.5 аралығында өзгертіліп, әртүрлі сценарийлер модельденді. Бұл параметр турбина кірісі мен шығысы арасындағы қысым айырмасын немесе басқару жүйелеріндегі релятивті қысым айырмасын білдіруі мүмкін.

Модельдеу нәтижелері келесіні көрсетті:

– Қысым коэффициентінің жоғарылауы турбинадағы кеңею жұмысына және жалпы пайдалы қуатқа оң әсер етеді;

– Алайда, бұл көрсеткіштің шекті мәндерінен асқанда эксергетикалық шығындар және қыздырғыштардағы жылу жүктемелері арта түседі;

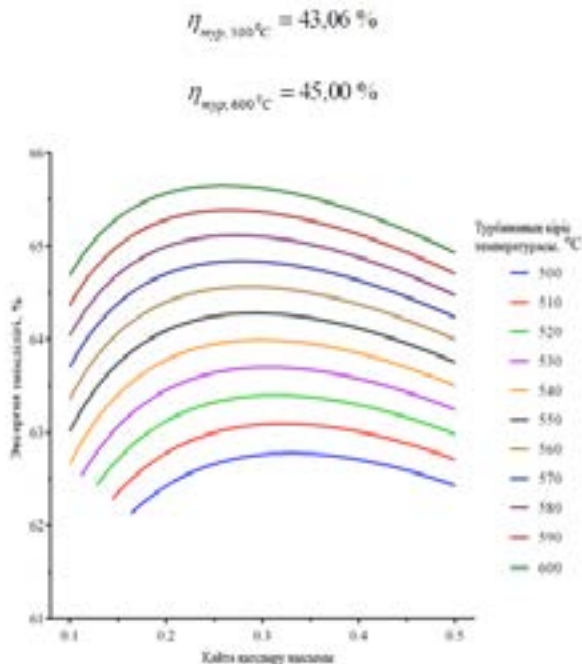
– Оптималды қысым коэффициенті 0.35–0.4 шамасында анықталды, бұл цикл тиімділігін максимумға жақындатады.



3-сурет – Қайта қыздыру қысымының қатынасының энергия тиімділігіне әсері – суперкритикалық жұмыс параметрлері үшін

Турбинаның кіріс температурасын 500 °C-ден 600 °C-қа өзгерткен кезде максималды тиімділік (оңтайлы қыздыру қысымының қатынасында байқалады) 43,06 % -дан 45 %-ға дейін өсті. Сондай-ақ, қайта қыздыру қысымының арақатынасының оңтайлы мәні турбинаның кіріс температурасының әртүрлі болуымен ерекшеленеді: турбинаның кіріс температурасы 500 °C үшін 0,328-ден 600 °C кезінде 0,26-ға дейін төмендеуі. Басқаша айтқанда, жылу тиімділігі барлық қайта қыздыру қысымының коэффициенттерінде температураның артуымен бірге өсу біршама біркелкі емес, бұл оңтайлы қыздыру қысымының (яғни, жылу тиімділігі максималды болатын қысым) турбинаның кіріс температурасының жоғарылауымен төмендеуіне әкеледі.

Турбина кіріс температурасының артуы тиімділіктің елеулі жақсаруына әкелді:



4-сурет – Қайта қыздыру қысымының қатынасының эксергия тиімділігіне әсері – суперкритикалық жұмыс параметрлері үшін

4-сурет бойынша станция жұмысының термодинамикалық тиімділігін арттыру мақсатында турбинаның кіріс температурасын 500°C -тан 600°C -қа дейін өзгерту арқылы модельдеу жүргізілді. Бұл зерттеу нәтижесінде жылу тиімділігі мен қайта қыздыру қысымының оптималды қатынасы арасындағы байланыс анықталды.

Температура жоғарылаған сайын бу энергиясының потенциалы артады. Бұл турбинада көбірек жұмыс өндіруге мүмкіндік береді, алайда бұл процесс бу жолының тиімді конфигурациясын өзгертуді талап етеді. Атап айтқанда, қайта қыздыру сатыларында қысым қатынасын төмендету арқылы жалпы эксергетикалық шығындарды азайтуға болады [9];[10].

Температура артқанда тиімділіктің өсуі қайта қыздыру қысымының барлық мәндерінде байқалады, бірақ бұл өсу біркелкі емес. Жоғары температурада жылу алмасу градиенттері, қайтымсыздықтар, және эксергия жоғалтулары өзгереді, бұл жалпы үрдістің оңтайлы қысым нүктесін төменге ығыстыруына себеп болады.

Суперкритикалық бу электр станциясының термодинамикалық циклін оңтайландыру барысында жүйенің тиімділігін арттыру, отын шығынын азайту, және эксергетикалық шығындарды төмендету мақсатында жұмыс параметрлерін жүйелі түрде таңдауды қарастырдық.

Қорытынды

Бұл зерттеу жұмысында бір рет қыздырылатын суперкритикалық бу электр станциясының термодинамикалық циклі жан-жақты зерттеліп, оның жылу-энергетикалық көрсеткіштерін оңтайландыру мақсатында түрлі параметрлерге әсері талданды. Атап айтқанда, турбина кірісіндегі бу температурасының (500–600 °C аралығында) және қайта қыздыру қысымының қатынасының (0.1–0.5 диапазонында) жылу тиімділігіне (η) әсері сандық модельдеу арқылы анықталды.

Жүргізілген имитациялық есептеулер нәтижесінде төмендегідей қорытындылар алынды:

Турбина кіріс температурасының жоғарылауы жылу тиімділікті арттыратыны дәлелденді: 500 °C кезінде тиімділік 43,06 % болса, 600 °C кезінде 45,00 %-ға жетті. Бұл – шамамен 1,94 пайыздық пунктке немесе 4,5 % салыстырмалы артықшылық.

Бу температурасы өскен сайын қайта қыздыру қысымының оптималды қатынасы төмендейді:

500 °C кезінде $R=0,328$

600 °C кезінде $R=0,260$.

Бұл үрдіс эксергетикалық шығындарды азайту үшін жоғары температурада бу қысымын төмен ұстау қажеттігін көрсетеді.

Жылу тиімділіктің өзгерісі температура мен қысым параметрлерінің күрделі өзара байланысына негізделген, бұл мультипараметрлік оңтайландыруды талап етеді.

Оптимизация нәтижелері Парето фронты түрінде ұсынылып, энергетикалық және эксергетикалық тиімділіктер арасындағы теңгерімді қамтамасыз ететін параметрлер анықталды.

Зерттеу нәтижелері болашақта суперкритикалық электр станцияларын жобалауда және қайта жаңғыртқанда жүйелік параметрлерді дұрыс таңдау, жылу үнемділігін арттыру, отын шығынын азайту, және экологиялық әсерді төмендету үшін қолдануға болады.

Оңтайландырылған термодинамикалық цикл – жоғары тиімділікке қол жеткізумен қатар, жабдықтардың ұзақ мерзімді жұмыс істеу сенімділігін де қамтамасыз етеді. Бұл энергия өндірісінің экономикалық және экологиялық тұрғыдан тиімділігін арттырады.

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ДЕРЕКТЕР ТІЗІМІ

1 **Онгар, Б., Ныгыманова, А. С.** Техникалық термодинамика (Оқулық). Қ. И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті басылымы Т. Кенеев атындағы «Polytech» баспа орталығы. – Алматы: ҚазҰТЗУ басылымы, – 2024. – 101 – б.

2 **Chen, X., Shi, Z., Zhang, Z., Zhu, M., Oko, E., Wu, X.** Dynamic modeling and comprehensive analysis of an ultra-supercritical coal-fired power plant integrated with post-combustion carbon capture system and molten salt heat storage. // *Energy*, – 2024. – №308. – P.132961.

3 **Suyog, S. S., Anand, K. K., Rajkumar, B. B., Kumar, R., Ongar, B., Sarsenbayev, Y., Kumar, S. P., Mohammad, S. S. Alsoufi, Elsheikh, A. A** New Approach for Failure Modes, Effects, and Criticality Analysis Using ExJ-PSI Model – A Case Study on Boiler System. // *Applied Sciences (Switzerland)*. – 2022. – Vol. – 12 – Issue. – 22 – P. 11419.

4 **Лесин, В. В., Лисовец, Ю. П.** Основы методов оптимизации. – М. : Изд-во МАИ, – 2015. – С. 344 .

5 **Рассохин, В. А.** Турбины конструкции ЛПИ : преимущества, характеристики, опыт разработки и реализация / В. А.Рассохин // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – 2016 – № 4 (135). – С. 41–51.

6 **Chi, S., Luan, T., Liang, Y., Hu, X., Gao, Y.** Analysis and Evaluation of Multi-Energy Cascade Utilization System for Ultra-Supercritical Units. *Energies*, – 2020. – № 13. – P. 3969.

7 **Белов, Г. В.** Органический цикл Ренкина и его применение в альтернативной энергетике // Наука и образование: науч. изд. МГТУ имени Н. Э. Баумана. – 2014. – № 2. – С. 99–124.

8 **Клименко, А. В.** [и др.]. Особенности комбинированного производства электроэнергии, тепла и холода на базе парогазовой установки / // Теплоэнергетика. – 2015. – № 3. – С. 11–15. – <https://doi.org/10.1134/S0040363615030042>.

9 **Ovsyannik, A. V.** Thermodynamic Analysis and Optimization of Low-Boiling Fluid Parameters in a Turboexpander // *Journal of Physics : Conference Series*. – 2020. – Vol. 1683. – No 042005.

10 **Ovsyannik, A. V.** [et al.]. Trigeneneration Units on Carbon Dioxide with Two-Time Overheating with Installation of Turbo Detainderand Recovery Boiler /// *Journal of Physics : Conference Series*. – 2020. – Vol. 1683. – № 042010

REFERENCES

- 1 **Ongar, B., Nygymanova, A. S.** Tehnikalyq termodinamika (Oqulyq). [Technique thermodynamics] // Q. Ī. Sätbaev atyndağy Qazaq ūlttyq tehnikalyq zertteu universiteti basylymy T. Kenееv atyndağy «Polytech» baspa ortalyğy. – Almaty : QazŪTZU basylymy, – 2024. – P. 101 .
- 2 **Chen, X., Shi, Z., Zhang, Z., Zhu, M., Oko, E., Wu, X.** Dynamic modeling and comprehensive analysis of an ultra-supercritical coal-fired power plant integrated with post-combustion carbon capture system and molten salt heat storage. // Energy. – 2024. – № 308. – P. 132961.
- 3 **Suyog, S. S., Anand, K. K., Rajkumar, B. B., Kumar, R., Ongar, B., Sarsenbayev, Y., Kumar, S. P., Mohammad, S. S. Alsoufi, Elsheikh, A.** New Approach for Failure Modes, Effects, and Criticality Analysis Using ExJ-PSI Model–A Case Study on Boiler System. // Applied Sciences (Switzerland). – 2022. – Vol. 12. – Issue. – 22. – P. 11419.
- 4 **Lesin V. V., Lisoves Īu. P.** Osnovy metodov optimizatsii. [Fundamentals of Optimization Methods] – M. : Īzd-vo MAĪ – 2015. – P. 344.
- 5 **Rassohin, V. A.** Turbiny konstruksii LPĪ : preimūshstva, harakteristiki, opyt razrabotki i realizasia // [LPI turbines: advantages, characteristics, development experience and implementation] // V. A. Rassohin // Nauchno-tehnicheskie vedomosti SPbGPU, – 2016 – № 4 (135). – P. 41–51.
- 6 **Chi, S., Luan, T., Liang, Y., Hu, X., Gao, Y.** Analysis and Evaluation of Multi-Energy Cascade Utilization System for Ultra-Supercritical Units. Energies . – 2020, – №13, – P. 3969.
- 7 **Belov, G. V.** Organicheski sikl Renkina i ego primenenie v ālternativnoi energetike [Organic Rankine Cycle and its Application in Alternative Energy]. // Nauka i obrazovanie: nauch. izd. MGTU im. N. E. Baumana. – 2014. № 2. P. 99–124.
- 8 **Klimenko A. V.** [i dr.]. Osobennosti kombinirovannogo proizvodstva elektroenergii, tepla i holoda na baze parogazovoi ustanovki /[Features of combined production of electricity, heat and cold based on a combined cycle gas turbine] // Teploenergetika. – 2015. – № 3. – P. 11–15. – <https://doi.org/10.1134/S0040363615030042>.
- 9 **Ovsyannik, A. V.** Thermodynamic Analysis and Optimization of Low-Boiling Fluid Parameters in a Turboexpander // Journal of Physics: Conference Series. – 2020. Vol. 1683. – No 042005.
- 10 **Ovsyannik A. V.** [et al.] .Trigeneration Units on Carbon Dioxide with Two-Time Overheating with Installation of Turbo Detainderand Recovery Boiler / // Journal of Physics: Conference Series. – 2020. – Vol. 1683. – № 042010.

15.09.25 ж. баспаға түсті.

11.11.25 ж. түзетулерімен түсті.

05.12.25 ж. басып шығаруға қабылданды.

*A. T. Dosanova¹, M. S. Isataev², B. Ongar³, *Zh. S. Duisenbek⁴*^{1,2}Kazakh National University named after al-Farabi,

Republic of Kazakhstan, Almaty;

³Kazakh National Research Technical University named after K. I. Satbaev,

Republic of Kazakhstan, Almaty;

⁴Gumarbek Daukeev Energo University, Republic of Kazakhstan, Almaty.

Received 15.09.25.

Received in revised form 11.11.25.

Accepted for publication 05.12.25.

OPTIMIZATION OF THERMODYNAMIC CYCLES OF SUPERCRITICAL STEAM GENERATORS

This article discusses in detail the issues of optimizing the thermodynamic cycles of highly critical steam generators. In the modern energy industry, improving the efficiency of steam power plants operating in a high-pressure and temperature zone is the main focus of ensuring energy conservation and environmental sustainability. In the course of the study, the thermodynamic parameters of steam generation in super-critical and ultra-super-critical modes based on the Rankine cycle were analyzed and their energy and exergetic parameters were compared.

Regenerative heat exchange systems, intermediate boiling processes, and exergetic analysis methods were used for optimization purposes. These approaches make it possible to increase the efficiency of steam generators, reduce heating costs and ensure efficient fuel use. In addition, the research results are aimed at improving the quality of heat balance and ensuring stable operation of steam generation systems.

Theoretical calculations were compared with real production parameters and effective ways of designing and upgrading highly critical steam generators were demonstrated. The article makes an important scientific and engineering contribution to modern energy, offering practical recommendations for improving the efficiency of power plants.

The results of this study determine the future directions of development of high-critical steam generators and lay the scientific foundation for the design of energy systems with high energy efficiency and environmentally friendly energy.

Keywords: steam generator, thermodynamic cycle, energy efficiency, optimization, regeneration, intermediate boiling, steam turbine.

*А. Т. Досанова¹, М. С. Исатаев², Б. Онгар³, *Ж. С. Дүйсенбек⁴*

^{1,2}Казахский национальный университет имени аль-Фараби,
Республика Казахстан, г. Алматы;

³Казахский национальный исследовательский технический университет
имени К. И. Сатпаева, Республика Казахстан, г. Алматы;

⁴Алматинский университет энергетики и связи имени Гумарбека Даукеева,
Республика Казахстан, г. Алматы.

Поступило в редакцию 15.09.25.

Поступило с исправлениями 11.11.25.

Принято в печать 05.12.25.

ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ЦИКЛОВ СВЕРХКРИТИЧЕСКИХ ПАРОГЕНЕРАТОРОВ

В данной статье подробно рассматриваются вопросы оптимизации термодинамических циклов высокотемпературных парогенераторов. В современной энергетической отрасли повышение эффективности парогенераторных установок, работающих в зоне высокого давления и температуры, является основным направлением обеспечения энергосбережения и экологической устойчивости. В ходе исследования были проанализированы термодинамические параметры парогенерации в супер-критическом и ультра-супер-критическом режимах на основе цикла Ренкина и сопоставлены их энергетические и эксплуатационные показатели.

В целях оптимизации использовались регенеративные теплообменные системы, промежуточные процессы кипения и методы энергетического анализа. Эти подходы позволяют повысить коэффициент полезного действия (КПД) парогенераторов, снизить затраты на отопление и обеспечить эффективное использование топлива. Кроме того, результаты исследования направлены на улучшение качества теплового баланса и обеспечение стабильной работы систем парогенерации. Теоретические расчеты сравнивались с реальными производственными параметрами и демонстрировались эффективные пути проектирования и модернизации высокотемпературных парогенераторов. Статья вносит важный научный и инженерный вклад в современную энергетику,

предлагая практические рекомендации по повышению эффективности энергетических установок.

Результаты этого исследования определяют будущие направления развития высокочритических парогенераторов и закладывают научную основу для проектирования энергосистем с высокой энергоэффективностью и экологически чистой энергией.

Ключевые слова: Парогенератор, термодинамический цикл, энергоэффективность, оптимизация, регенерация, промежуточное кипение, паровая турбина.

Теруге 17.12.2025 ж. жіберілді. Басуға 30.12.2025 ж. қол қойылды.

Электронды баспа

29.9 Mb RAM

Шартты баспа табағы 22,2. Таралымы 300 дана. Бағасы келісім бойынша.

Компьютерде беттеген: А. К. Мыржикова

Корректор: А. Р. Омарова, Д. А. Кожас

Тапсырыс № 4494

Сдано в набор 17.12.2025 г. Подписано в печать 30.12.2025 г.

Электронное издание

29.9 Mb RAM

Усл. печ. л. 22,2. Тираж 300 экз. Цена договорная.

Компьютерная верстка: А. К. Мыржикова

Корректор: А. Р. Омарова, Д. А. Кожас

Заказ № 4494

«Toraighyrov University» баспасынан басылып шығарылған

Торайғыров университеті

140008, Павлодар қ., Ломов к., 64, 137 каб.

«Toraighyrov University» баспасы

Торайғыров университеті

140008, Павлодар қ., Ломов к., 64, 137 каб.

67-36-69

E-mail: kereku@tou.edu.kz

www.vestnik-energy.tou.edu.kz