

Тұрмыстық қатты қалдықтарды қайта өңдеу үшін қатты жылу тасымалдаушысы бар жылдам пиролиз технологиясы

Еламан Айбульдинов^{1,2}, Нуркен Нурғалиев^{2*}, Руслан Сафаров^{3*}, Жанар Искакова^{1*}, Айнагүл Колпек^{3*}, Тогжан Машан³, Лязат Кусепова³

¹Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университетінің Жаңа химиялық технологиялар ғылыми-зерттеу институты, Астана, Қазақстан; elaman@mail.ru, iskakova_zhb@enu.kz

²К. Кулажанов атындағы Қазақ технология және бизнес университеті, химия, химиялық технология және экология кафедрасы, Астана, Қазақстан; elaman@mail.ru, nurgaliev_nao@mail.ru

³Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, жаратылыстану ғылымдары факультетінің химия кафедрасы, Астана, Қазақстан; safarov_rz@enu.kz, kolpek_a@enu.kz, mshan_tt@enu.kz, kusseпова_la@enu.kz

*Корреспонденция: nurgaliev_nao@mail.ru, safarov_rz@enu.kz, iskakova_zhb@enu.kz, kolpek_a@enu.kz

Дәйексөз: Айбульдинов, А., Нурғалиев, Н., Сафаров, Р., Искакова, Ж., Колпек, А., Машан, Т., Кусепова, Л. (2025). Тұрмыстық қатты қалдықтарды қайта өңдеу үшін қатты жылу тасымалдаушысы бар жылдам пиролиз технологиясы. Л.Н. Гумилев атындағы ЕҰУ-нің хабаршысы. Химия. География. Экология сериясы, 150(1), 11-35.

<https://doi.org/10.32523/2616-6771-2025-150-1-11-35>

Академиялық редактор:
Э.Е. Копишев

Редакцияға түсті: 24.02.2025
Түзетілді: 26.02.2025
Қабылданды: 10.03.2025
Басылымға шықты: 31.03.2025



Copyright: ©2025 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC) license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

Аңдатпа. Тұрмыстық қатты қалдықтарды (ТҚК) қайта өңдеу урбанизация мен қалдықтардың көбеюіне байланысты экологиялық проблемаларды шешу үшін өте маңызды. Бұл мақалада тұрмыстық қатты қалдықтарды тиімді өңдеу үшін қатты жылу тасымалдаушылары бар жылдам пиролиз технологиясын пайдалану қарастырылады. Алғашында жанғыш тақтатастарды өңдеу үшін әзірленген технология өзінің күлін пайдалана отырып жылу тасымалдағыш ретінде, оттегісіз ортада қалдықтарды термиялық ыдыратуды қарастырады. Бұл әдіс синтетикалық мұнай, газ, жылу және электр энергиясын, құрылыс материалдары мен ферроқорытпаларды т.б. құнды өнімдерді өндіруге мүмкіндік береді. Зерттеу аясында өнімділігі 150 000 тонна/жыл (УТТ-500) және 1 000 000 тонна/жыл (УТТ-3000) болатын жылдам пиролиз қондырғыларына кешенді техника-экономикалық талдау жүргізіледі, олардың техникалық жағдайын, экономикалық тиімділігін және экологиялық көрсеткіштерін бағалайды. Нәтижесінде, бұл технология дәстүрлі өртеумен салыстырғанда зиянды шығарындыларды айтарлықтай азайтуға мүмкіндік береді және қалдықтардың әртүрлі түрлерін қайта өңдеуді қамтамасыз етеді. Жабық цикл бойынша алынған нәтижелер экономикалық жағынан тиімді және қалдықтарды тұрақты өңдеу тәжірибесін енгізуге ықпал ете отырып, қатты тұрмыстық қалдықтарды өңдеуді жақсарту үшін жылдам пиролиз әдісінің артықшылығын дәлелдейді. Бұл зерттеу, қалдықтарды кәдеге жарату тиімділігін арттыру және қоршаған ортаға тигізетін зиянды әсерді азайту, қалалық жерлерде қалдықтарды өңдеу мәселелерін шешу үшін инновациялық шешімдердің қажеттілігін көрсетеді.

Түйінді сөздер: тұрмыстық қатты қалдықтар (ТҚК); жылдам пиролиз; қатты жылу тасымалдағыш; қалдықтарды энергияға айналдыру; техникалық-экономикалық талдау.

1. Кіріспе

Қатты тұрмыстық қалдықтарды өңдеу тарихы қалалар мен жаңа технологиялардың дамуының көрінісі болып табылады. Ежелгі уақытта қалдықтарды көбінесе өртеген немесе қала сыртына тастаған. Ортағасырлық Еуропада тұрмыстық қоқыстар санитарлық тазалық өмірдің маңызды аспектісіне айналғанға дейін көшеде жай жиналатын. XIX ғасырдың аяғында халық санының өсуімен және урбанизациямен байланысты, алғаш рет өртеу қондырғылары мен қалдықтарды кәдеге жарату жүйелері салына бастады.

Тұрмыстық қатты қалдықтарды (ТҚК) қайта өңдеу урбанизацияның, халық санының өсуінің және экологиялық мәселелердің артуына байланысты дүние жүзінде қалдықтарды басқару стратегияларының маңызды құрамдас бөлігіне айналды (Ma, J. және т.б., 2016; Guan, D. және т.б. 2024; Vanchurin, V. және т.б., 2022). Бұл процесс тұрмыстық және коммерциялық қалдықтар арасынан қайта өңдеуге жарамды материалдарды жинауды, сұрыптауды және жаңа өнімдерге түрлендіруді қамтиды. Осылайша полигондарға немесе өртеу қондырғыларына жіберілетін қалдықтардың көлемін азайтады. Қайта өңдеу технологияларындағы елеулі жетістіктерді арттыруға қарамастан, жаһандық қайта өңдеу салыстырмалы түрде төмен деңгейде қалып отыр, 2020 жылғы жағдай бойынша дүние жүзінде ТҚК-дың шамамен 13,5 % ғана қайта өңделеді (Kaza, S. және т.б., 2018). Бұл муниципалитеттердің де, жалпы елдердің де қалдықтарды басқару мәселелері бойынша, оларды шешу үшін қалдықтарды кәдеге жарату жүйелері мен саясатын жетілдірудің шұғыл қажеттілігін көрсетеді.

Қатты тұрмыстық қалдықтарды кәдеге жарату бағдарламаларының тиімділігіне әртүрлі факторлар әсер етеді, соның ішінде жұртшылықтың қатысуы, технологиялық мүмкіндіктер, экономикалық тиімділік және нормативтік-құқықтық база (Vukovic, N. және т.б., 2022; Ren, Z. және т.б., 2024; Kumar, R. және т.б., 2024; Louzizi, T. және т.б., 2024). Кейбір елдер қайта өңдеу бойынша кешенді бастамаларды жүзеге асыруда айтарлықтай жетістіктерге қол жеткізгенімен, инфрақұрылымның жеткіліксіздігімен, ресурстардың шектеулілігімен және адамдардың қатысуының болмауымен бетпе-бет келеді. Сонымен қатар, қазіргі заманғы тұтыну тауарларының, әсіресе электроника мен қаптаманың жасалған материалдарының күрделілігі қайта өңдеу процесіне қосымша қиындықтар туғызады (Farzadkia, M. және т.б., 2021; Nassajfar, M.N. және т.б., 2024).

Зерттеушілер мен саясаткерлер қатты тұрмыстық қалдықтарды кәдеге жарату тиімділігін арттыру және қоршаған ортаға әсерді азайту үшін инновациялық шешімдерді зерттеуді жалғастыра отырып, циклді экономика қағидаттарын қабылдауға және қалдықтардың пайда болуының түпкі себептерін жою үшін тұтынудың неғұрлым тұрақты үлгілерін әзірлеуге көбірек көңіл бөлуде (Asif, M. және т.б., 2025; Kowalski, Z. және т.б., 2024).

Қатты тұрмыстық қалдықтармен жұмыс істеу саласында қалдықтарды энергияға айналдыру тұжырымдамасы, қалдықтарды кәдеге жаратудың тиімді тәсіліне айналды. Бұл әдіс қалдықтарды түрлендіріп, олардың мөлшерін азайту және энергия өндіру мәселелерін шеше отырып, осы процестің құнды баламалы энергия көзі бола алатынын дәлелдейді (Liu, J. және т.б., 2023; Kasiński, S. және т.б., 2024).

Осындай перспективалы тәсілдердің бірі қатты жылу тасымалдаушыны пайдаланатын жылдам пиролиз болып табылады. Ол қалдықтардың әртүрлі түрлерін, соның ішінде қатты тұрмыстық қалдықтарды қайта өңдеудің әлеуетті шешімін ұсынады. Дәстүрлі пиролиз әдістерінен айырмашылығы, жылдам пиролиз арнайы араластырғышта миллисекунд ішінде жүреді. Мұнда шикізат 800°C дейін қыздырылған күлмен жанасады және қатты қалдықтың температурасын тез арада 500-520°C дейін көтеріледі. Бұл әдіс жылдам термиялық ыдырау процесін пиролиз процесінен ерекшелендіреді. Ол әдетте төмен температурада (300-400°C)

бірнеше сағатты алады және қалыпты қыздыру жылдамдығымен бірнеше минуттан бірнеше сағатқа дейін жүретін стандартты пиролизден әлдеқайда жылдам жүріледі. Араластырғыштағы бастапқы қадамнан кейін материал айналмалы барабан реакторына түседі, онда ол 15-20 минут ішінде одан әрі пиролизденеді, бұл қалдықтардың пайдалы өнімдерге айналуын қамтамасыз етеді.

Жылдам пиролиз әртүрлі өнеркәсіптік процестерде, атап айтқанда жанғыш тақтатастар мен қоңыр көмірді өңдеуде сәтті жүзеге асырылды (Asadullah, M. және т.б., 2013). Бірнеше зерттеулер бұл әдіс дәстүрлі баяу пиролизбен салыстырғанда өнімнің жылу шығару тиімділігі мен өнімділігін айтарлықтай арттыратынын көрсетті (Yorgun, S. және т.б., 2015). Дегенмен, бұл әдістің қатты тұрмыстық қалдықтарды өңдеуде қолданылуы бойынша зерттеулер өте аз.

Зерттеу жұмысы қаладан шығарылған қалдықтарды тұрақты өңдеу үшін жылдам пиролизге бейімдеу және оңтайландыру жолындағы маңызды қадам болып табылады.

Дүние жүзінде қалдықтарды энергияға айналдырудың кең таралған әдісі қалдықтарды жағу. Ол сұрыпталмаған немесе өңделмеген қалдықтарды қайта өңдей алады, сонымен бірге қалдықтардың көлемін 90%-ға дейін азайта отырып, энергия өндіреді, осылайша полигондарға қажеттілікті азайтады (Assi, A. және т.б., 2020; Zhou, W. және т.б., 2024). Дегенмен, бұл процестің кемшіліктері де жоқ емес. Жанудың жанама өнімдері, соның ішінде күл қалдықтары және газ тәрізді шығарындылар көбінесе қоршаған ортаға айтарлықтай қауіп төндіреді. Осы қауіптерді азайту үшін қазіргі заманғы өртеу қондырғыларында газды тазартудың көп сатылы күрделі жүйелері қолданылады. Бір қызығы, бұл тазарту жүйелерінің құны көбінесе бастапқы жағуға арналған жабдықтың құнынан асып кетеді, бұл осы тәсілдің экономикалық тиімсіздігін көрсетеді (Zhang, Y. және т.б., 2021; Sharma, P. және т.б., 2024).

Керісінше, термиялық ыдырау технологиялары, атап айтқанда пиролиз, қатты тұрмыстық қалдықтарды қайта өңдеу үшін тікелей жағуға перспективалы балама ұсынады (Kasiński, S. және т.б., 2024; Vinnichenko, V. және т.б., 2023; Sarker, T.R. және т.б., 2024; Razzak, S.A., 2024; Rauch, R. және т.б., 2024; Cui, W. және т.б., 2024). Пиролитикалық әдістердің қатты тұрмыстық қалдықтарды термиялық өңдеуде бір қатар артықшылықтары бар. Олар зиянды шығарындыларды, әсіресе улылығы жоғары полихлорланған дибензопарадиоксиндер мен дибензофурандарды айтарлықтай азайтады (Cui, W. және т.б., 2024; Traven, L., 2023; Liang, Y. және т.б., 2021). Сонымен қатар, пиролиз әдістері жан-жақты, ол отынды дайындауды қажет етпейді және әртүрлі құрамдағы қалдықтарды қайта өңдеуге мүмкіндік береді (Narayani Sarma, R. және т.б., 2023; Wang, J. және т.б., 2019; Li, N. және т.б., 2022). Бұл қоршаған ортаға түсетін зиянды қалдықтарды азайту, пиролизден кейінгі қалдықтарды энергияға айналдыру технологияларының дамып келе жатқан нұсқасы.

Инновациялық технологиялар ТҚК кәдеге жаратудың жаһандық мәселелерін ескере отырып, өңдеудің тиімділігін арттыру және қоршаған ортаға зиянды әсерді азайту үшін маңызды шешімдер қабылдауы тиіс. Осындай перспективалы тәсілдердің бірі қатты жылу тасымалдаушысы бар жылдам пиролиз әдісі болып табылады. Ол қалдықтардың әртүрлі түрлерін, соның ішінде қатты тұрмыстық қалдықтарды қайта өңдеудің әлеуетті шешімін ұсынады. Бұл зерттеуде жылына 150 000 тонна қалдықты өңдеуге қабілетті қатты жылу тасымалдаушысы бар қондырғыларда жылдам пиролиз технологиясын қолдана отырып, қатты тұрмыстық қалдықтарды өңдеудің техника-экономикалық талдауы ұсынылған ((UTT-500) және 1 000 000 тонна/жыл (UTT-3000) құрғақ масса). Бастапқыда жанғыш тақтатастарды қайта өңдеу үшін әзірленген әдіс қатты тұрмыстық қалдықтарды қайта өңдеуге бейімделген. Бұл әдіс қалдықтарды қайта өңдеу мен кәдеге жаратудың дәстүрлі әдістерінен қарағанда тиімдірек және экологиялық таза балама ұсына алады.

Ұсынылып отырған технология 1940 жылдары Кржижановский, Г.М. (Мәскеу, Ресей) Энергетика институтының мамандары әзірлеген жылдам пиролиз әдісіне негізделген (Potarov, O.P. және т.б., 2017). Әдіс жылу тасымалдағыш ретінде өз күлін пайдалана отырып, оттегісіз ортада ұсақ ұнтақталған шикізаттың үздіксіз термиялық ыдырауын қамтамасыз етеді. Процесс барысында бу-газ қоспасымен көміртекті қалдығы (жартылай кокс) алынады (Volkov,

Е.Р. және т.б., 1999). Бұл әмбебап әдіс тақтатаc, қоңыр көмір, қатты тұрмыстық қалдықтарды қоса алғанда, әртүрлі төмен әлеуетті шикізатты өңдеуге жарамды (Gerasimov, G. және т.б., 2019).

Осы технология Балтық аймағындағы жанғыш тақтатастарын өңдейтін бірнеше зауыттарда сәтті қолданылып келеді. Нақты мысалдарға мыналар жатады: Кивыли химиялық зауытында (Эстония) екі УТТ-500 бірлік қондырғысы, Эстония электрстанциясындағы «Майзауытында» екі УТТ-3000 бірлік қондырғысы және Кохтла-Ярвадағы (Эстония) үш УТТ-3000 бірлік қондырғысы (Tugov, A.N. және т.б., 2016). Осы УТТ типтегі қондырғылардың жалпы өңдеу қуаты жылына 5,3 миллион тоннадан асады және пайдалану мерзімі 6-12 жылдан (Кохтла-Ярве) 40 жылға дейін созылады («Майзауыты») (Potarov, O.P., 2016).

Технологияны жанғыш тақтатастарын өңдеуде ұзақ уақыт қолдану, оның сенімділігі мен тиімділігін көрсетеді. Бұл қатты тұрмыстық қалдықтарды өңдеуге осы қондырғыларды қолданудың тиімділігін білдіреді. Біздің зерттеулеріміз қатты тұрмыстық қалдықтарды қайта өңдеуге қатысты мәселелерді шешу үшін осы технологияны бейімдеуге және оңтайландыруға бағытталған. Қалдықтарды өңдеудің дәстүрлі әдістерімен ұсынылып отырған әдісті салыстырғанда энергияны қалпына келтіру және қоршаған ортаға әсер ету тұрғысынан айтарлықтай артықшылықтары бар.

Қайта өңдеуге арналған мұндай кешенді тәсіл қатты тұрмыстық қалдықтарды басқарудың өзекті мәселесін шешіп қана қоймайды, сонымен қатар әртүрлі өнеркәсіптік қалдықтардың жиналуын жою жолдарының шешімін ұсынады. Жылдам пиролиз әдісі қалдықтарды құнды ресурстарға айналдыру арқылы технологияны экономикалық тиімді етеді және қалдықтарды өңдеудің тұрақты тәжірибесіне айналуына ықпал етеді (Moradi, R. және т.б., 2024). Қалдықтардың алуан түрін қайта өңдеу әдісі бір мезгілде көптеген құнды өнімдерді алу мүмкіндігі бар жылдам пиролиз технологиясының жан-жақтылығы мен экономикалық тиімділігін көрсетеді.

Бұл зерттеудің мақсаты қатты жылу тасымалдаушысы бар жылдам пиролиз технологиясын пайдалана отырып, қатты тұрмыстық қалдықтарды өңдеуге кешенді техника-экономикалық талдау жүргізу болып табылады. Атап айтқанда, біз ұмтыламыз:

1. Қуаттылығы жылына 150 мың тонна (УТТ-500) және 1 000 000 тонна (УТТ-3000) болатын ТҚҚ өңдеуге арналған жылдам пиролиз қондырғыларының техника-экономикалық тиімділігіне баға беру.

1. Пиролиз процесі арқылы синтетикалық мұнай, газ, жылу және электр энергиясын, құрылыс материалдарын, ферроқорытпаларды және басқадай бағалы өнімдерді өндіру әлеуетін бағалау.

2. Бастапқыда жанғыш тақтатастарды өңдеу үшін әзірленген бұл технологияны қатты тұрмыстық қалдықтарды, қоңыр көмірді және өнеркәсіптік қалдықтарды, бұдан басқа жеңіл өнеркәсіп өндірісіне қажетті шикізаттың әртүрлі түрлерін өндіруге бейімдеуді зерттеу.

Осы талдау арқылы біз қалаларда қалдықтарды кәдеге жарату және ресурстарды қалпына келтірудің негізгі мәселелерін шеше отырып, тұрмыстық қатты қалдықтарды өңдеудің экономикалық тұрғыдан тиімді және экологиялық жағынан таза болатыны туралы шешімдерді әзірлеуге үлес қосуға тырысамыз.

2. Материалдар мен әдістер

2.1 Сынамаларды дайындау

Тұрмыстық қатты қалдықтардың (ТҚҚ) сынамаларын дайындау әдістемесі сынамаларды іріктеу, өңдеу және сақтаудың стандарттарына, талдауды және сапаны бағалауды қамтамасыз ететін нақты ережеге сүйене отырып жасалған. Сақтау жағдайларына және қалдықтардың күйіне байланысты сынамаларды алудың әртүрлі әдістері қолданылды. Сынаманы конвейр арқылы жүргізілген материал ағынынан алу қолайлы әдіс болып табылады. Себебі ол материалдың біртектілігіне байланысты болатын қателерді барынша азайтты. Сынамалар

барлық партия бойынша біркелкі таралуын қамтамасыз ететін жылжымалы конвейер таспасынан алынды. Көліктің жәшігінен сынама алу, қалдықтар тізбек арқылы партиялармен жөнелтілген кезде жүргізілді. Әрбір партия үшін көлік жәшігінің әртүрлі деңгейлерінен (бетінен, ортасынан және түбінен) алынған нүктелік сынамалардың белгілі бір мөлшері қажет болды. Егер қалдықтар үйінділерде немесе контейнерлерде жиналса стационарлық материалдардан (жинақталған қалдықтардан) сынама алу жүргізілді. Бұл жағдайда біркелкі композицияны қамтамасыз ету үшін үлгілер бірнеше рет іріктелді.

Материалдың біркелкілігін және репрезентативтілігін қамтамасыз ету үшін әрбір топтамада іріктелген үлгілер саны кем дегенде 24 болуы қажет. Жиналған үлгілерді бөлшектерінің өлшемін <100 мкм болатындай етіп ұсақтайды. Сынамада фракциялық бөліну болдырмау және сынаманың құрамы біркелкі болуын қамтамасыз ету үшін ұнтақтау мен гомогенизация процесінің алдында сынаманы алдын ала өңдеуден өткізді.

Зерттелетін үлгінің ылғалдылығы 15%-дан жоғары болған жағдайда кептіру жүргізілді. Мұндай жағдайларда материал +5°C аспайтын температурада бір аптадан аспайтын мерзімге сақталды. Егер ұзақ мерзімге сақтау қажет болса, зерттеу алдында сынаманы кептіру қажет. Дайындалған үлгілер ылғалдың сіңуіне және олардың химиялық қасиеттерінің өзгеруіне жол бермеу үшін құрғақ бөлмеде ауа өткізбейтін контейнерлерде сақталды. Үлгінің шығу тегі, сынамаларды алу әдісі және сақтау шарттары туралы барлық мәліметтер зертханалық журналда жазылды. Сынамаларды дайындаудың бұл әдістемесі қатты тұрмыстық қалдықтардың құрамын зерттеудің жоғары дәлдігін қамтамасыз етіп, олардың жылдам пиролиз арқылы өңдеуге жарамдылығын объективті бағалауға мүмкіндік берді.

2.2. ТҚҚ-ды пиролиздеу процесі

ТҚҚ термиялық ыдырауының, қатты, сұйық және газ тәріздес өнімдерінің шығымдылығын талдау 470-520°C температура диапазонында жүргізілді. Процесс алюминийлі ретортында жүргізіледі. Онда үлгі оттегісіз атмосферада 80 минут бойы қыздырылды. Бұл қондырғы конденсацияға ұшырайтын органикалық компоненттердің ыдырауын бақылауға және ұшқыш өнімдерді жинауға мүмкіндік береді. Нақты сандық анықтауды қамтамасыз ету үшін экспериментке алынған фракцияларды жүйелі түрде бөлу және өлшеу қажет.

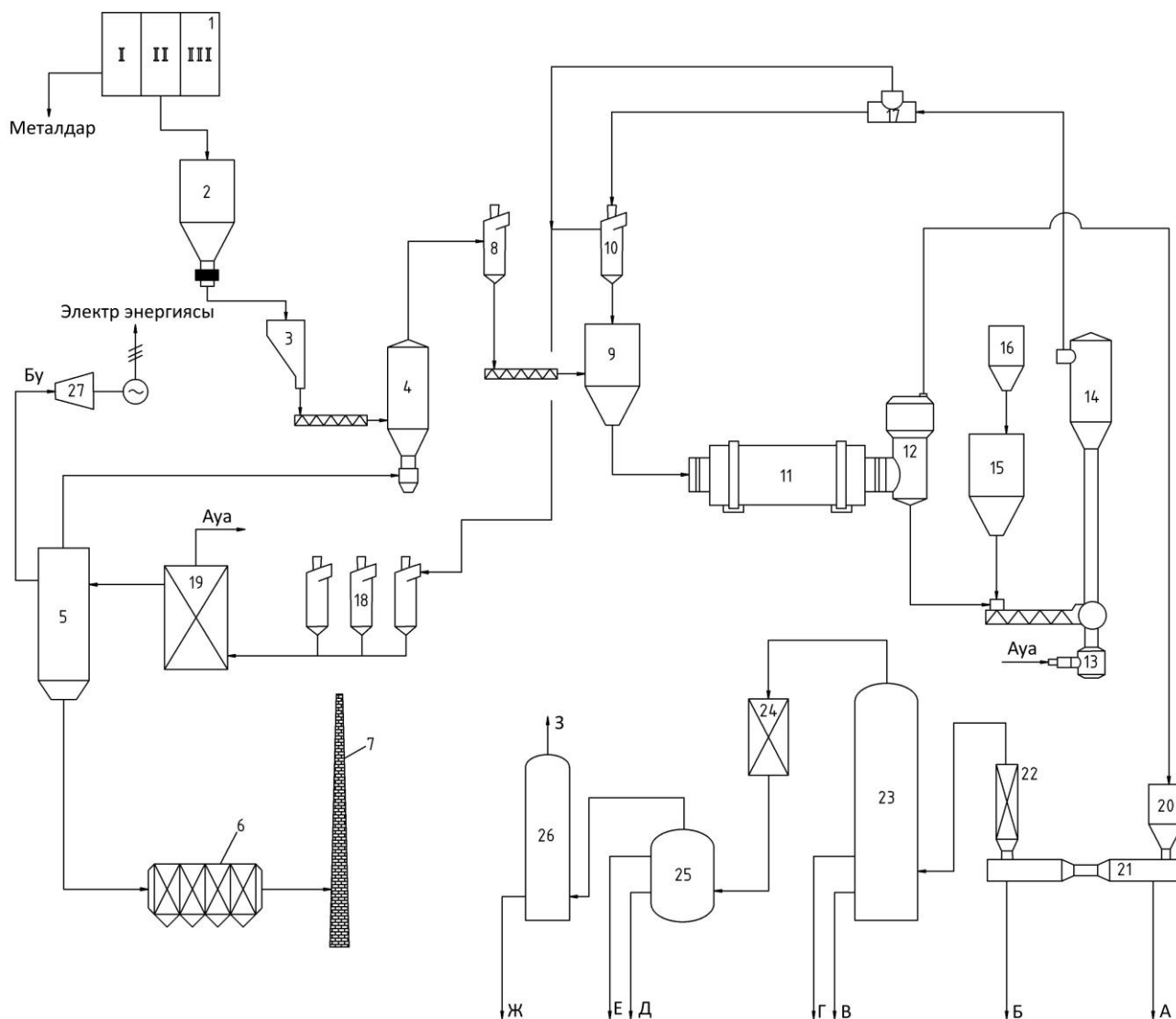
Пиролизден кейін ретортта қалған қатты қалдық (көмірқышқылдандырғыш) карбонизацияланған фракцияның шығымдылығын анықтау үшін өлшенді. Шайыр мен пиролизикалық судан тұратын конденсацияланған фаза су моншасында салқындалатын қабылдағышқа жиналады. Пиролит суының массасы толуол негізіндегі дистилляция әдісі арқылы анықталды. Ал шайырдың шығымы конденсацияланған өнімдердің жалпы массасынан пиролит суының массасын алу арқылы есептеледі. Газ фракциясы үлгінің бастапқы массасы мен көмір, шайыр және пиролизикалық су массаларының қосындысы арасындағы айырма ретінде есептеледі. Нәтижелердің дәлдігін қамтамасыз ету үшін барлық өлшеулер жоғары дәлдіктегі аналитикалық таразылардың көмегімен жүргізілді.

Соңғы кездегі жиналған деректер салыстырмалы талдауды жеңілдету үшін бастапқы күйлері әртүрлі құрғақ қосылыстар аналитикалық жағдайларға келтірілді. Әдістеме пиролиз өнімдерінің жаппай таралуын егжей-тегжейлі бағалауға мүмкіндік тудырады. Бұл қатты тұрмыстық қалдықтарды бағалы энергия тасымалдаушыларына айналдырудың тиімділігі туралы түсінік берді. Экспериментті бірнеше рет қайталап жасау нәтижелердің дұрыстығын қамтамасыз ете отырып, ықтимал қате көздерін азайту үшін жүргізіледі.

Технологияның басты ерекшелігі – ұсақталған қалдықтар бөлініп сұрыпталғаннан кейін сұйық күйге ауыстырылады, ал қатты салқындатқыш (ҚС) ретінде ауа бұрқақты жылытқышта қыздырылған 0-2 мм өлшемді құм қолданылады. Содан кейін ТҚҚ қоспасы әкпен бірге айналмалы барабанды пиролиз реакторына беріледі.

1-суретте тұрмыстық қатты қалдықтарды өңдеуге арналған қондырғының сұлбасы көрсетілген. ТҚҚ өңдеу әдісі қатты қалдықтарды сұрыптау және жіктеу, қатты жылу

тасымалдауышпен араластыру, конденсацияға жіберілетін өнімдерден бу-газ қоспасын алуға арналған барабан типті реакторда пиролиздеу және қатты көміртекті қолдана отырып бу алу үшін жылуды қалпына келтіру кезеңдерін қамтиды.



Сурет 1. Қатты салқындатқышы бар жоғары температуралы пиролиздің сұлбасы
 1 – дайындық блогы, 2 – фидер, 3 – қабылдау бункері, 4 – ауа арқылы кептіргіш, 5 – жылу қазандығы, 6 – электростатикалық шөгінділер, 7 – түтін мұржасы, 8 – қатты тұрмыстық қалдықтар циклоны, 9 – араластырғыш, 10 – салқындатқыш циклон, 11 – айналмалы пеш реакторы, 12 – шаң ұстағыш, 13 – ауа жібергіш пеші, 14 – ауа арқылы жылытқыш, 15 – құм бункері, 16 – ауа толтырылған бункері, 17 – салқындатқышты айналып өту, 18 – күл циклондары, 19 – күл жылуалмастырғыш, 20 – дымқыл скруббер, 21 – газ жинау құбыры, 22, 24 – салқындатқыштар, 23 – дистилляциялық колонна, 25 – сепаратор, 26 – мұнара раковинасы, 27 – бутурбинасы. Өнімдер: А – пиролизге арналған ластанған май, В – ауыр-орташа фракция, С – орташа май, D – дизельдік фракция, E – фенолды су, F – бензиндік фракция, G – су және газ конденсаты, H – тұтынушыларға арналған жартылай коксты газ.

Тұрмыстық қатты қалдықтар мен өндірістік қалдықтар кәсіпорынның өндірістік алаңына автомобиль немесе конвейер арқылы тасымалданады. Дайындық бөлімінде (1) қалдықтар ішінара (партиялармен) алдын ала дозиметриялық бақылаудан өтеді, топтарға бөлінеді және сұрыпталады. Мысалы, металл бөлшектерін немесе металл тәріздес заттарды

электромагниттік сепараторлармен ұстау, содан кейін қара металды престоу (түсті металды қолмен алып тастау мүмкіндігі бар) және 0-25 мм фракцияларға ұсақтау, бөгде заттарды кетіру арқылы бейорганикалық бөлікті жіктеу.

Өңдеуге дайындалған шикізат таспалы конвейер арқылы фидерге беріледі (2). Содан кейін қатты қалдықтар конвейер таразы арқылы өтіп, шикізатқа арналған шнектің (шнекті конвейердің) қабылдау бункеріне (3), содан кейін шнекпен ауа арқылы кептіргішке (4) беріледі. Шнек араластырғыштан атмосфераға газдың түсуіне жол бермеу үшін шнек араластырғыш тығыздағыш камерамен жабдықталады.

Кептіруге арналған бу температурасы 150-350°C болатын өңдеу қазандығынан (5) шығатын түтін газы болып табылады. Қалдықты кептіру құбыры абсорберлердегі ұшпа оксидтерден және электростатикалық шөгіндідегі шаңнан тазартылады (6), содан кейін түтін құбыры арқылы атмосфераға шығарылады (7). Қара және түсті металдар құрғақ, ұсақталған қалдықтардан алынып тасталады.

Кептіру сатысынан кейін қатты тұрмыстық қалдықтар циклонға (8) түседі және тығыздағыш бұранда мен сөре түріндегі араластырғышта (9) араластыру сатысына беріледі, содан кейін шикізат өңдеуден алынған күлмен бірге салқындатқыш циклонға (10) жеткізіледі, онда 800-1000°C температурада шикізат құммен және әкпен өңделеді. Шикізат пен салқындатқышты араластырған кезде қоспаның температурасы 470-520°C аралығында болады және пиролиз процесі айналмалы барабан реакторында басталады (11). Қатты салқындатқыштың қатты тұрмыстық қалдықтарға қатынасы 2-3 аралығында болғанда пиролиз процесі жүзеге асырылады.

Реактордан бу-газ қоспасы түріндегі пиролиз өнімдері (сұйық фракциялар буларының және пиролиз ылғалдылығының қоспасы), күл және жартылай кокс кіріктірілген циклондары бар шаң тұндыру камерасына (12) түседі, онда ағындар бөлінеді: қатты фаза жартылай кокс үшін шнекке жіберіледі, ал бу-газ қоспасы механикалық қоспалардан циклондық тазартудан өтеді және конденсациялық жабдыққа түседі, онда ол сұйық синтетикалық отын (ауыр, орташа және жеңіл), газбензин, пирогендік отын фракцияларына бөлінеді. Жартылай кокс газы салқындаған кезде оның ылғалдылығы артады.

Бұрандалы тығыздау камерасындағы жартылай кокс құрамындағы қатты фазаны ауа фонтанды пешіне (13) береді, онда көміртек қалдығы 780-800°C температурада жанып кетеді. Көміртекті жағу үшін үрлеу арқылы температурасы 300-400°C болатын ауа беріледі. Жану температурасы ауа ағынымен реттеледі ($\alpha < 1$).

Ауа фонтанының қыздырғышы (14) құм бункеріне (15) және әк бункеріне (16) тығыздағыш бұранда арқылы қосылады және төменгі жағындағы ауа фонтанды пешіне қосылады.

Ауа фонтанды пештен күл-газ ағыны жылу тасымалдағыштың айналма жолы (17) арқылы өтеді, онда ол екі ағынға бөлінеді, олардың бірі жылу тасымалдағыш циклондарына бағытталған, ал екіншісі циклондарды айналып өтеді. Циклондар пиролиз процесіне қажетті жылу тасымалдағыштың мөлшерін бөледі. Оның шығыны реактордағы температура сенсорының импульсі бойынша жылжымалы демпфермен (қақпамен) циклонға баратын күл-газ қоспасының ағынын өзгерту автоматты түрде реттеледі.

Жылу тасығыш циклондарынан кейін күл-газ ағындары біріктіріліп, үш сатыда орнатылған күл циклондарына (18) бағытталады. Циклондарда ұсталған күл ауырлық күшімен күлді жылу алмастырғышқа (19) түседі, онда ол өзінің жылуын ауа фонтаны пеші мен жылуды қалпына келтіру қазандығы үшін жарылыс ауасына береді. Қыздырылған ауаның температурасы 300-400°C, ал салқындатылған күлдің температурасы 90°C.

Күлден тазартылған және 780°C температурадағы түтін газы жылуды қалпына келтіру қазандығына жіберіледі, оның потенциалдық және физикалық жылуы энергетикалық параметрлері (3,9 МПа, 440°C) бу алу үшін пайдаланылады. Қазандықтан барлық сұйық фракциялар алынғаннан кейін жартылай кокс газымен, балқыту пештерінде газ бар болса, онда ол қажет болған жағдайда сұйық отынмен өңделеді. Қазандықтың түбіндегі

пайдаланылған газдардың температурасы 150°C . Газдар электростатикалық сүзгіде соңғы тазалауға ұшырайды және бу жолы арқылы атмосфераға шығарылады, немесе шикізатты кептіру үшін пайдаланылады.

УТТ қондырғыларында электр энергиясын өндіру пиролиз процесіндегі химиялық және физикалық жылууды кәдеге жаратуға негізделген. Ауа-фонтанды пеште температура ауа беруді реттеу арқылы дұрысталады. 800°C температураны ұстап тұру үшін берілетін ауа мөлшері жартылай кокстағы көміртектің толық жануы үшін қажетті деңгейден төмен болуы керек. Нәтижесінде түтін газының құрамындағы СО-нің концентрациясы жоғары (өнімдер толық жанбайды) болады. СО-не бай бұл газ кейіннен циклондарда күл жойылғаннан кейін қалдық жылу қазандығында жағылады. Сонымен қатар, қалдық жылу қазандығы конденсация қондырғысынан жартылай коксты газды және балқыту цехынан СО газын алады. Бұл газдардың химиялық энергиясы түтін газының физикалық жылуымен және алдын ала қыздырылған жарылыс ауасымен (күлді салқындату кезінде күл жылу алмастырғышта кызады) жоғары энергиялы бу өндіру үшін қолданылады. Содан кейін бұл бу электр энергиясын өндіруге арналған турбинаға (27) жіберіледі.

Шаң камерасынан бу-газ қоспасы соңғы тазалауға «дымқыл» скрубберге (20) жіберіледі, содан кейін ауыр фракцияны, орташа фракцияны (дизельдік фракцияны алу мүмкін), бензин фракцияларын және пиролиз ылғалдылығын жою үшін сатылы конденсациядан өтеді. Сұйық фракциялар сұйық өнімдердің аралық қоймасына жіберіледі, одан тауарлық паркке айдалады, онда әртүрлі пропорцияларда араластыру арқылы әртүрлі тауарлық өнімдер алуға болады (қазандық және пеш отыны, турбиналық отын, дизельдік отын, бункерлеуге арналған құрамдас бөліктер, теңіз отыны, мазут аналогтары). Пиролиз ылғалдылығы ауа фонтанды пеште отты бейтараптандыруға ұшырайды. Жоғары калориялы жартылай кокс газы жылууды қалпына келтіру қазандығына жіберіледі.

Технологиялық күл шайырдың ауыр фракциясының тотығуы нәтижесінде алынған битум негізіндегі асфальтбетонды өндіру үшін қолданылады. Күлдің бір бөлігін шихтаға қажетті қоспалармен (көмір, кварцит, темір, манга-нез, әктас) ферроқорытпалар алынатын балқыту пештеріне жіберуге болады.

2.3. УТТ-500 және УТТ-3000 қондырғыларының техникалық сипаттамалары

УТТ-500 және УТТ-3000 қондырғылары қатты жылу тасымалдаушысы бар жылдам пиролиз әдісімен ТҚҚ өңдеуге арналған инновациялық кешендер болып табылады. Бастапқыда жанғыш тақтатастарды өңдеу үшін әзірленген бұл технология қалдықтарды өңдеудің дәстүрлі әдістеріне экологиялық таза балама ұсына отырып, ТҚҚ тиімді түрде кәдеге жаратуға бейімделген.

Өндірістік объектілерді жылытуға және ыстық сумен жабдықтауға арналған жылу энергиясы күлді салқындату кезінде түтікшелі күл жылу алмастырғышта пайда болады. Жылуалмастырғыштың жоғарғы бөлімдерінде күлді ауамен 800°C -тан 400°C -қа дейін салқындатады, ал төменгі бөліктерде одан әрі сумен 400°C -тан $50-90^{\circ}\text{C}$ -қа дейін салқындатады. Температурасы $90-110^{\circ}\text{C}$ жылытылған су тұтынушыларға орталықтандырылған жылу желісі арқылы беріледі. Бұл ретте 400°C дейін қыздырылған ауа ауа-фонтанды пешке және қалдық жылууды қалпына келтіру қазандығына жіберіледі.

УТТ-500 және УТТ-3000 қондырғыларының айрықша белгілеріне мыналар жатады:

1. Өңдеу қуаттылығы: УТТ-500 жылына 150 000 тоннаға дейін (тәулігіне 500 т) қалдықты өңдей алады, ал УТТ-3000 жылына 1 миллион тоннаға дейін (3330 т/тәу) қалдықты өңдеуге қабілетті.

2. Өнімнің шығарылымы: Өңдеу кезінде қондырғылар синтетикалық мұнай, газ, жылу және электр энергиясын, құрылыс материалдарының компоненттерін, ферроқорытпаларды шығарады.

3. Өзін-өзі энергиямен қамтамасыз ету: Кешендер электр және жылу энергиясына өздерінің қажеттіліктерін қанағаттандыруға қабілетті.

4. Қоршаған ортаны қорғау өнімділігі: Технология зиянды шығарындыларды азайтуға және ресурстарды тиімді пайдалануды қамтамасыз етуге арналған.

5. Икемді орналасу: нысандар әртүрлі учаскелерде, соның ішінде жұмыс істейтін немесе жоспарланған полигондарда, қалдықтарды сұрыптау зауыттарында және өнеркәсіптік аймақтарда орналасуы мүмкін.

Қуаттылығы жылына 1 миллион тонна УТТ-3000 кешені 16,4 гектар аумақты алып жатыр. Кәсіпорынның ең төменгі рұқсат етілген санитарлық-қорғау аймағы қоршаудан 1 км арақашықтықта болады.

УТТ-500 кешенінің жалпы қоршалған аумағы 6,55 гектарды құрайды. Кәсіпорынның ең төменгі рұқсат етілген санитарлық-қорғау аймағы қоршаудан 1 км радиуста орналасқан.

Шикізаттың ылғалдылығы 12 % дейін болғанда кептіру қажет емес. Ылғалдылығы жоғары болған жағдайда шикізат алдын ала кептіріледі, бұл зауыттың шикізатты өңдеу қабілетін арттырады.

Нысанның жұмыс істеуі үшін келесі энергия ресурстары қажет:

- Электр қуатын және электр энергиясын тұтыну: сәйкесінше 6 237 кВт және 42,9 гВт/сағ. Міншікті тұтыну 1 тонна шикізатқа 40 кВт/сағ.

- Өндірістік объектілерді жылытуға және ыстық сумен жабдықтауға арналған жылу энергиясы.

- Айналымдағы техникалық сумен жабдықтау жүйесіндегі шығынның орнын толтыру үшін қажетті техникалық су: 16,5 м³/сағ.

Алғашқы екі ресурсқа сұраныс нысанның өз өндірісі арқылы қанағаттандырылады.

Осылайша, аталмыш нысандар қалдықтарды құнды ресурс ретінде тиімді өңдеуді үйлестіре отырып, тұрақты экономикалық даму ережелеріне сәйкес келетін ТҚК кәдеге жарату мәселесінің кешенді шешімі болып табылады.

Мақалада көрсетілген балқыту цехынан шығатын түтін газы және пирогендік ылғал сияқты бірнеше құрамдас бөліктер жоғары жылдамдықтағы пиролиз процесінде және материалды екінші рет қайта пайдалануда маңызды рөл атқарады.

Технологиялық үдеріс жұмысының функциялары төмендегідей болады:

- Балқыту цехы: балқыту цехындағы күл құм, темір және көмір сияқты қоспаларды балқыту үшін қолданылады. Бұл процесс бағалы материалдарды, соның ішінде феррокорытпаларды қалпына келтіруге, қалдықтардың түзілуін азайтуға және экономикалық айналым принциптерін қолдауға мүмкіндік береді. Сонымен қатар, балқыту процесінде пайда болатын қалдық көміртек тотығы (СО) жылу қазандығына жіберіліп, жүйеге қосымша жылу энергиясын береді.

- Түтін газы: мұржа арқылы сыртқа шығатын түтін газы, бөлшектерді кептіру үшін электростатикалық тұндырғыш арқылы өтетін қалдық жылу қазандығынан шығатын түтін газы. Газды дұрыс өңдеу қоршаған ортаны қорғау ережелерін сақтауды қамтамасыз етеді және атмосфераға шығатын қалдықтарды азайтады.

- Пирогендік ылғал: бұл пиролиз реакторынан бу-газ қоспасын салқындату кезінде конденсация қондырғысында жиналған конденсацияланған су фракциясы. Ол термиялық ыдырау кезінде қалдық материалдан бөлінетін ылғалдан тұрады. Пирогенді ылғалдың жойылуы пиролиздің тиімділігін оңтайландыруға көмектеседі.

2.4. Элементтік талдау

Қатты және сұйық үлгілердің элементтік талдауы Multi EA® 5100 әмбебап анализаторының (Analytik Jena, Германия) көмегімен жүргізілді. Бұл құрал сұйық, қатты, паста тәрізді және мұнай, мұнай өнімдері және басқа да органикалық матрицалар үлгілеріндегі күкірт, хлор, азот және көміртек құрамын анықтауға мүмкіндік береді.

Үлгі массасы 10 мг-нан аспайды. Қатты үлгілер шарикті диірменде бөлшектер өлшемі <100 мкм болатындай етіп ұнтақталады. Сұйық үлгілер 5 минут шайқау арқылы гомогенизацияланды.

Құралды калибрлеу анықталатын әрбір элемент үшін сертификатталған анықтамалық материалдарды (CRMs) пайдалану арқылы орындалды. Калибрлеу қисықтары күкірт, азот, хлор үшін 0,001% - 10% және көміртегі үшін 0,1% - 50% концентрация диапазонында тұрғызылды. Бақылау үлгілерінің сапасы күнделікті талдау арқылы бақыланып отырады. Алынған нәтижелердің стандартты нәтижелерден салыстырмалы ауытқуы барлық анықталған элементтер үшін 2 %-дан аспады.

Барлық өлшеулер үш рет орындалды. Нәтижелерді статистикалық өңдеу OriginPro 2022 бағдарламалық құралын қолдану арқылы орындалды (OriginLab Corporation, АҚШ).

3. Нәтижелер

3.1. ТҚҚ құрамы

Зерттеуге Астана қаласындағы (Қазақстан) полигондарынан сынамалар алынды. ТҚҚ құрамын 1-кестеден көруге болады.

Кесте 1. Құрамындағы металды бөліп алғанға дейін және бөліп алғаннан кейінгі тұрмыстық қатты қалдықтардың (ТҚҚ) құрамы (% салмағы бойынша)

Компонент	Қағаздар	Тамақ қалдықтары	Сүйек	Ауладағы қалдықтар	Шыны	Тас	Түсті металдар	Қара металдар	Пол имерлер	Аккумуляторлар	Бығары, резеңке	Тоқыма бұйымдар	Ағаш	Керамика	Медициналық қалдықтар	Басқалар	Скрининг (16 мм-ден аз)	Барлығы
Металды бөліп алу алдындағы контент (%)	16,9	25,9	0,3	3,5	9,2	0,8	0,11	0,954	7,2	0,3	2,3	4,6	2,7	1,0	0,02	12,3	11,8	100,00
Металды бөліп алғаннан кейінгі құрамы (%)	17,05	26,1	0,34	3,56	9,26	0,84	0,03	0,29	7,22	0,33	2,36	4,59	2,73	1,07	0,02	12,37	11,86	100,00

Экстракциядан кейінгі құрам бөліктедің көпшілігінің пайыздарының шамалы жоғарылауын, яғни металдардың жойылуын көрсетеді. Мысалы, қағаздың үлесі 16,9%-дан 17,05%-ға, тамақ қалдықтарының үлесі 25,9%-дан 26,1%-ға өсті. Өте аз өзгерістер сүйек (0,3%-дан 0,34%-ға дейін), аула қалдықтары (3,5%-дан 3,56%-ға дейін) және шыны (9,2%-дан 9,26%-ға дейін) сияқты басқа металл емес компоненттерде байқалады.

Керісінше, түсті және қара металдардың үлесі айтарлықтай төмендеді. Түсті металдар 0,11%-дан 0,03%-ға, қара металдар 0,954%-дан 0,29%-ға дейін төмендеген, бұл олардың қалдықтардан сәтті тазарғанын көрсетеді. Былғары, резеңке, тоқыма, ағаш, керамика және әртүрлі бұйымдар сияқты басқа компоненттер де жалпы трендке сәйкес шамалы өсім көрсетті.

Тұтастай алғанда, деректер ТҚҚ-дан металдардың тиімді тазаруын көрсетеді, нәтижесінде металл құрамының азаюына байланысты металл емес құрамдас бөліктердің салыстырмалы үлесі шамалы артады.

Ленинград кен орнының жанғыш тақтатастарының және Астана полигондарының ТҚҚ-ның элементтік құрамын талдау олардың элементтік құрамы бойынша айтарлықтай сәйкестігін көрсетті. Олардың элементтік құрамы құрғақ қалдық массасы бойынша (% масса) келесідей: С – 23,01; Н₂ – 2,92; S (барлығы) – 0,12; О₂ – 14,97; N₂ – 0,53; Cl₂ – 0,10.

Ленинград кен орнының жанғыш тақтатастарының және Астана полигондарының ТҚҚ элементтік құрамының талдауы айтарлықтай ұқсастықтар мен айырмашылықтарды көрсетеді. Екі материалда да көміртегінің салыстырмалы құрамы бар, тақтатаc 23,41% және ТҚҚ 23,01%, бұл жану арқылы энергия өндірудің ұқсастығы барын көрсетеді. Сутегінің мөлшері де дерлік бірдей, тақтатаc 2,91% және ТҚҚ 2,92%, бұл олардың органикалық құрамдағы ұқсастығын көрсетеді.

Дегенмен, екі материалда да оттектен пен күкірт мөлшері айтарлықтай ерекшеленеді. ТҚҚ-та оттектің мөлшері 14,97%, бұл тақтатастағы 3,48%-бен салыстырғанда оттектің мөлшері әлдеқайда жоғары екенін білдіреді, бұл жану процесіне және шығарындылар профилине әсер етуі мүмкін. Керісінше, тақтатаc құрамында күкірттің жалпы мөлшері 1,64%, ал ТҚҚ небәрі 0,12%, бұл күкірт шығарындыларына қатысты қоршаған ортаға әсер етуі мүмкін. Азот пен хлордың деңгейі екі материалда да салыстырмалы түрде төмен, бірақ ТҚҚ тақтатастағы 0,15%-бен салыстырғанда 0,53% жоғары, ал хлордың мөлшері екеуінде де бірдей 0,1%. Бұл өзгерістер энергия көздері ретінде осы материалдарды пайдалану маңызды екенін көрсетеді.

Екі шикізаттың элементтік құрамының ұқсастығына сүйене отырып, тақтатастарды өңдеу үшін қолданылатын технологияны Астана қаласының полигондарының қалдықтарына және ТҚҚ-ға да қолдануға болады деген қорытынды жасауға болады. Бұл қалдықтарды өңдеу бойынша тиімдірек және экологияға зиян келтірмейтін жағдай жасауға мүмкіндіктер туғызады.

ТҚҚ-тағы және жанғыш тақтатастағы органикалық заттардың элементтік құрамының ұқсастығы пиролиз кезіндегі салыстырмалы ыдырау процесін және кейіннен бу-газ қоспасының түзілуін көрсетеді. Конденсация қондырғысында салқындату кезінде бұл қоспа синтетикалық мұнайдың, жартылай кокс газының және пироликалық ылғалдың сұйық фракцияларына бөлінеді. Бұл әрекет Фишер реторты және қатты жылу тасымалдауышпен қыздыру процесін модельдейтін зертханалық масштабты орнату арқылы жүргізілген ауқымды эксперименттер арқылы дәлелденді.

3.2. Өнімдерді қайта өңдеу

Қалдықтарды өңдеу процесі қатты тұрмыстық қалдықтарды қауіпсіз кәдеге жаратуды ғана емес, сонымен бірге қалдықтарды құнды өнімдерге айналдыруды да қамтиды. Қоқысқа тасталған қалдықтарды қайта өңдеу және кәдеге жарату процестері нәтижесінде түзілетін негізгі өнімдерге мыналар жатады:

- Синтетикалық сұйық отын: УТТ-3000 үшін 300-400 тонна/тәу (УТТ-500 үшін 50-70 тонна/тәу) – қазандық, пеш және басқа да отындар сияқты коммерциялық отынның әртүрлі

түрлерін алу үшін ауыр, орташа және бензин фракциялары әртүрлі пропорцияларда араластырылуы мүмкін.

- Электр қуаты: 50-90 мВт, оның ішінде ішкі қажеттіліктерге 6,5 мВт (УТТ-500 үшін – 6,7 есе аз). Электр энергиясын желіге беруге немесе күлді балқыту үшін пайдалануға болады.
- Жылу энергиясы: 70 мВт/сағ, УТТ-3000 үшін 1650 мВт/тәу (УТТ-500 үшін – 6,7 есе аз).
- Күл: тәулігіне 1400-2000 тонна, күлдің құрамына байланысты (күлділігі төмен болған жағдайда салқындатқыш ретінде құм немесе әктас қосуға болады) асфальт, бетон қоспаларымен ферроқорытпалар алу үшін қолданылады. Ылғалды қосқаннан кейін сақтаған кезде ол қатып, инертті материалға айналады.
- Сұрыпталған металдар: түстіметалдар (0,03%) және қараметалдар (0,3%).

Күлді кәдеге жарату болмаған жағдайда оның көлемі ТҚҚ жұмыс массасының 20-45%-ын немесе 600-1500 тонн/тәулігіне құрайды (УТТ-500 үшін 100-240 тонна/тәулігіне). Күл инертті газ және ылғал қосылып тығыздалған кезде қатаяды.

3.3. Технологиялық есептеулер

Алынған шикізат қоспасының құрамы қалдықтардың құрғақ массасы үшін өнімділігі 500 тонн/тәулігіне болатын қатты салқындатқышы бар УТТ-500 қондырғысында өңдеуге негізделген қалдықтардың түрлері бойынша жылдық кірістер есебінен алынды.

2, 3, 4-кестелерде қатты тұрмыстық қалдықтарды сұрыптау кезіндегі шикізат қоспаларының құрамы, олардың элементтік құрамы және пиролиз өнімдерінің шығымы көрсетілген.

Кесте 2. ТҚҚ компоненттерінің сипаттамасы

ТҚҚ сұрыптаудан алынған шикізаттың атауы	Қалдықтар салмағы, т/тәу	Ылғалдылық, %	Құрғақ масса, т/тәу	Қоспадағы мөлшері, %
Қағаз, картон	12 369	35,0	8 040	5,4
Шыны	6 023	-	6 023	4,0
Ағаш	2 126	43,0	1 212	0,8
Полимерлер	4 464	10,0	4 018	2,7
Алюминий	722	-	722	0,5
Тоқыма бұйымдар	32 176	30,0	22 523	15,0
Тағам қалдықтары	8 929	80,0	1 786	1,2
Мұнаймен майланған шпалдар	3 400	22,0	2 652	1,8
Мұнай шламы	7 500	25,8	5 569	3,7
Алынған қоспаның құрамы, %				
Жалпы қоспалар	77 708		52 543	35,0
ТҚҚ және күл шлам қоспасы (50/50 қатынасы)	139 224	30,0	97 457	65,0
Жалпы шикізат	216932	30,9	150000	100,0

Кесте 3. ТҚҚ компоненттерінің элементтік құрамы

ТҚҚ сұрыптаудан алынған шикізаттың атауы	Органикалық заттардың элементтік құрамы және құрамдас бөлігінің күлділігі, құрғақ массасы %					
	С	Н	О	N	S	Күл*
Қағаз, картон	43,6	5,8	44,4	0,3	0,2	5,7
Ағаш	49,1	5,9	41,0	0,2	0,1	3,9
Полимерлер	59,3	8,3	19,3	1,0	0,4	10,2
Тоқыма бұйымдар	53,5	6,5	30,7	4,6	0,1	4,6
Тағам қалдықтары	44,9	5,4	25,8	3,8	0,1	20,0
Мұнаймен майланған шпалдар	52,7	6,3	37,3	0,2	0,1	3,4
Мұнай шламы	51,40	8,68	1,93	0,56	0	37,4
Алынған қоспаның құрамы, %						
Жалпы қоспалар	15,7	2,1	8,9	0,8	0,08	7,5
ТҚҚ және күл шлам қоспасы (50/50 қатынасы)	10,9	1,4	3,3	0,2	0,1	49,1
Жалпы шикізат	26,62	3,44	12,22	0,96	0,18	56,5

Кесте 4. Пиролиз өнімдерінің шығымы

ТҚҚ сұрыптаудан алынған шикізаттың атауы	Пиролиз өнімінің шығымы, құрғақ салмағы %		
	Мұнай	Газ	Жартылай кокс
Қағаз, картон	16,62	16,16	36
Ағаш	16,62	16,16	36
Полимерлер	90	6,5	3
Тоқыма бұйымдар	47	19	30
Тағам қалдықтары	48	20	29
Мұнаймен майланған шпалдар	30	17	34
Мұнай шламы	34,1	9,3	43,3
Алынған қоспаның құрамы, %			
Жалпы қоспалар	12,9	4,9	9,4
ТҚҚ және күл шлам қоспасы (50/50 қатынасы)	4,6	5,2	54,6
Жалпы шикізат	17,50	10,14	64,00

Бұдан шикізаттың жалпы көлемін жылына 216 932 тоннаны құрайтынын, ылғалдылығы 30,9%, нәтижесінде 150 000 тонна құрғақ масса пайда болатынын көруге болады. Қағаз, картон және тоқыма бұйымдары ең үлкен бөліктерді құрайды, бұл қоспаның құрғақ массасына айтарлықтай үлес қосады. Элементтік құрам полимерлер мен майланған шпалдар сияқты материалдардағы көміртектің жоғары мөлшерін көрсетеді, бұл пиролиз арқылы энергияны қалпына келтірудің айтарлықтай әлеуетін көрсетеді.

Пиролиз өнімінің шығымы әртүрлі материалдарға байланысты өзгереді. Мысалы, полимерлер 90% құрғақ салмақта майдың жоғары шығымдылығын көрсетеді, ал әйнектен май алынбайды, бірақ процесте инертті болып қалады. Тоқыма және тамақ қалдықтары да сәйкесінше 47% және 48% деңгейінде майдың шығымдылығын көрсетеді. Жалпы қоспа қоспасы барлық шикізаттың 35%-ын құрайды, күлдің мөлшері 7,5% құрайды, бұл түпкілікті құрамға және өнім шығымына әсер етеді.

Жалпы алғанда, талдау 50/50 қатынасы бар ТҚҚ және күл қожының қоспасы пиролиз процесіне әсер ететін 49,1% күлділікке ие екенін көрсетеді. Шикізат құрамының әртүрлі болуы мұнайдың, газдың және жартылай кокстың әртүрлі шығымдылығына әкеледі, бұл

энергияны қалпына келтіру және қалдықтарды азайту үшін пиролиз процесін оңтайландырудың жетістігін көрсетеді.

Алынған қоспа үшін жартылай кокстелетін өнімдердің шығымы және 1 тонна құрғақ шикізат қоспасының термиялық ыдырауы кезіндегі бөлінетін жылу мөлшері анықталды (5-кесте).

Кесте 5. Жартылай кокстелетін өнімдердің шығымы және 1 тонна құрғақ шикізат қоспасының термиялық ыдырауы кезіндегі бөлінген жылу мөлшері

Параметрлері/Өнімдер			Мұнай	Газ	Пирогендік ылғал	Жалпы ұшпа заттар	Кокс қалдығы	Барлығы
Өнімнің жану жылуы, кДж/кг	Ең жоғарғы		38064,56	39385,04	-	-	1893,42	-
	Ең төменгі		35848,97	35871,75	2512,00	-	1871,23	-
Өнімдердің салмақ шығымы, кг/т			175,00	101,40	7,10	283,50	716,50	1000,00
1 тонна құрғақ шикізатқа есептелген ықтимал жылу, мДж/т	Ең жоғарғы	мДж/т	6661,30	3993,64	-	10 654,94	1 356,64	12041,96
		%	55,32	33,16	-	88,48	11,27	99,75%
Ең жоғарғы	Ең жоғарғы	мДж/т	6273,57	3637,40	17,84	9 928,80	1340,73	11264,25
		%	55,69	32,29	0,16	88,14	11,90	100,05%

5-кестеде жартылай кокстелетін өнімдердің шығымы және бір тонна құрғақ шикізат қоспасының термиялық ыдырауынан түзілетін жылу мөлшері көрсетілген. Осыдан өнімдердің, әсіресе мұнай мен газдың жану жылуының айтарлықтай жоғары екенін көруге болады, ең жоғары мәндері мұнай өнімі үшін шамамен 38 065 кДж/кг және газ үшін 39 385 кДж/кг жетеді. Мұнайдың салмақтық шығымы тоннасына 175 кг құрайды. Оның ең жоғары мәні 6661,30 мДж/т потенциалдық жылуды қамтамасыз етеді, бұл жалпы энергия шығымының жартысынан астамын құрайды. Газ да тоннасына 101,40 кг энергия өндіруге үлес қосады, бұл жалпы жылу мөлшерінің шамамен үштен бір бөлігін құрайды, 3993,64 мДж/т.

Пирогендік ылғалдылық 7,10 кг/т салмағы бойынша минималды болса да, жалпы жылу бөлуге аз әсер етеді. Салмағы 716,50 кг/т болатын кокс қалдығында тооннасына бөлінетін жылу мөлшері өте аз. Оның бөлетін жылуының ең жоғары мөлшері 1356,64 мДж/т.

Мұнай мен газды қоса алғанда, жалпы ұшпа заттар 283,50 кг/т құрайды және жалпы жылудың 88,48 % мөлшерін құрайды, бұл олардың шикізат қоспасы арқылы энергияны қалпына келтіру процесіндегі маңызды рөл атқаратынын көрсетеді.

Жалпы алғанда, 5-кестеде шикізаттың термиялық ыдырау процесінде бөлінген жылуды энергияға айналдырудың тиімділігі жоғары екенін білдіреді. Жылудың көп бөлігі мұнай мен газ өндіруден алынады, бұл жылу оларды жартылай кокстеу процесінде түзілетінін білдіреді.

Пиролиз нәтижесінде түзілген өнімдерден 1 тонна құрғақ массаға шаққандағы алынған қоспа үшін органикалық заттардың құрамындағы элементтердің мөлшері анықталды (6-кесте).

Кесте 6. 1 тонна құрғақ шикізат қоспасынан пиролиз өнімдеріндегі химиялық элементтердің таралуы

Атауы/элементтер	Күл	S	C	H	N	O	Жалпы	
Құрғақ шикізат	кг	565,4	2,20	266,20	34,40	9,60	122,20	1000
	%	56,54	0,22	26,62	3,44	0,96	12,22	100
Май	кг	-	0,09	138,67	17,15	1,05	18,04	175,00
	%	-	0,05	79,24	9,80	0,60	10,31	100,00
Газ	кг	-	-	65,78	15,76	-	19,86	101,40
	%	-	-	64,87	15,54	-	19,59	100,00
Жартылай кокс	кг	565,40	2,11	61,75	0,70	8,55	77,98	716,50
	%	78,91	0,29	8,62	0,10	1,19	10,88	100,00
Ылғал	кг	-	-	-	0,79	-	6,31	7,10
	%	-	-	-	11,11	-	88,89	100,00

Күлдің басым бөлігі, яғни 565,40 кг, жартылай кокстеу өнімдерінің жалпы массасының 78,91%-ын құрайды. Күкірт аз мөлшерде болса да, негізінен жартылай кокстеу өнімдерінде (2,11 кг) және мұнайда (0,09 кг) кездеседі. Көміртектің таралуы мұнайға (138,67 кг) және газға (65,78 кг) бөлінген үлестің айтарлықтай көп мөлшерін иеленеді. Олар сәйкесінше 79,24% және 64,87 % құрайды, бұл пиролиз процесінде олардың көміртекті тасымалдаушылардың негізгісі екенін көрсетеді. Сутек негізінен мұнай мен газда көптеп кездеседі, оның мөлшері мұнайда 17,15 кг (9,80%) және газда 15,76 кг (15,54%) болады. Азот негізінен жартылай кокста (8,55 кг) кездеседі, оның массасы 1,19% құрайды. Оттегінің мөлшері газда 19,86 кг және жартылай кокста 77,98 кг, бұл сутек пен азотқа қарағанда айтарлықтай жоғары, олардың массасы сәйкесінше 19,59% және 10,88% құрайды. Ылғалдылықтың элементтік құрамының көп бөлігі, дерлік оттектен (88,89 %) және сутектен (11,11%) тұрады.

Жартылай кокстің көп мөлшерін күл мен күкірт иеленетінін, ал мұнай мен газ сутек пен көміртектен тұратынын көруге болады. Жартылай кокстегі күл мен күкірт тәрізді жанама өнімдерді анықтай отырып мұнай мен газ құрамындағы бағалы энергия көзі бола алатын компоненттерді шоғырландыруда пиролиз процесінің тиімді екені белгілі болды. Шикізат пен пиролиз өнімдерінің жану жылуы жүргізілген тәжірибелер көмегімен анықталды (7-кесте).

Кесте 7. Шикізат пен пиролиз өнімдерінің жану жылуы

Атауы/ Параметрлер	Жоғары жану жылуы, Q_H , кДж/кг	Төменгі жану жылуы, Q_I , кДж/кг	Жоғары жану жылуы, Q_H , ккал/кг	Төменгі жану жылуы, Q_I , ккал/кг
Құрғақ шикізат	12 042	11 264	2 876	2 690
Мұнай	38 065	35 849	9 092	8 562
Газ	39 385	35 872	9 407	8 568
Жартылай кокс	1 893	1 871	452	447

Мұнай мен газда жану жылуы өте жоғары, мұнайда 38 065 кДж/кг, ал газда 39 385 кДж/кг, шикізаттың жану жылуы 12 042 кДж/кг және жартылай кокстың жану жылуы 1893 кДж/кг. Мұнай мен газ үшін ең төменгі жылу мәндері шикізат пен жартылай коксқа қарағанда айтарлықтай жоғары. Мұнай мен газ өнімдерін пиролиз процесі кезінде түзілген энергияны шоғырландыру тиімді екенін және оларды энергия көзі ретінде пайдалануға болатынын білдіреді. Алынған деректер пиролиз өнімдерінің, атап айтқанда мұнай мен газдың бастапқы шикізат пен жартылай коксқа қарағанда энергетикалық шығымы жоғары екенін көрсетеді.

Әртүрлі жағдайда әртүрлі негіздегі жану жылуы мен шикізаттың құрамы анықталды (8-кесте).

Кесте 8. Шикізаттың құрамы және жану жылуы

Атауы	W	A	S	C	H	N	O	Жалпы	Жану жылуы Q, кДж/кг	
									Жоғарғы	Төменгі
Жұмыс салмағына, %	20,98	44,68	0,17	21,03	27,72	0,76	9,66	100,00	9 515	8 374
Аналитикалық салмағына, %	2,2	55,30	0,22	26,03	3,36	0,94	11,95	100,00	11 777	10 961
Құрғақ салмақ, %	-	56,54	0,22	26,62	3,44	0,96	12,22	100,00	12 042	11 264
Жанғыш массасы бойынша, %	-	-	0,51	61,25	7,92	2,21	28,12	100,00	27 708	25 919
Органикалық заттарда (құрғақ күлсіз заттарда), %	-	-	-	61,56	7,96	2,22	28,26	100,00	27 794	25 995

Орташа желдеткіші бар жабық қоймада сақталған ылғалдылығы 21%-ға дейін кептірілген 1 тонна шикізат үшін материалдық және жылу балансының мәні 9-кестеде келтірілген.

Кесте 9. 1 тонна шикізат үшін материалдық және жылу балансы

Параметрлері	Шығымы					Шығымы						
	Ауа	Шикізат ¹	Су	Иіс газы ²	Жалпы	Ылғал ³	Газ ⁴	Күл	Бу	Май	Жалпы	%
Салмағы, кг	2160	1000	1429	68	4656	6	2669	444	1429	108	4656	100
Физикалық жылу, ГДж	0,181	0,015	0,615	0,04	0,85	0,019	0,918	0,038	4,727	0,011	5713	51,08
Химиялық жылу, ГДж	-	9,515	-	0,82	10,34	-	-	-	-	3,882	3,882	34,70
Жылудың жалпы мөлшері, ГДж	-	-	-	-	11,19	-	-	-	-	-	9,595	85,78
Жылуды тұтыну, ГДж	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,59	14,22

¹ылғалдылығы 21%;

²балкыту цехынан;

³пирогенетикалық;

⁴түтін

9-кестеде салмақ, физикалық жылу, химиялық жылу, жалпы жылу және жылу шығыны бойынша кіріс пен шығысты көрсететін бір тонна шикізаттың материалды-жылу балансының егжей-тегжейлі бөлінуі берілген. Кірістерге ауа, 21% ылғалдылығы бар шикізат, су және балқыту цехының СО газы кіреді, жалпы салмағы 4,656 кг. Жалпы жылу шығыны 11,19 гДж құрайды, оның басым бөлігі шикізаттың химиялық жылуы есебінен (9,515 гДж). Сонымен қатар су физикалық жылуды айтарлықтай көбейтеді (0,615 гДж).

Пиролиз процесі өнімдерінің шығысына пирогендік ылғал, түтін газы, күл, бу және мұнай жатады. Шығарылатын заттардың жалпы салмағы кірістерге сәйкес келеді, бұл процестің кіретін және шығатын өнімдерінің салмағының бірдей болуы масса сақталу заңына сәйкес келеді. Жалпы жылу шығару 9,595 гДж, ең үлкен үлесті бу (физикалық жылу 4,727 гДж) құрайды. Түтін газы сонымен қатар жылудың айтарлықтай мөлшерін (0,918 гДж физикалық жылу) иеленеді. Процестің жалпы жылу тиімділігі жоғары, енгізілетін өнімдерден алынатын жылудың 85,78%-ы шығарылатын өнімдерге пайдаланылады, ал жылудың 14,22%-ы тұтынуды құрайды, бұл пиролиз процесінің жылуын энергия көзі ретінде пайдаланудың тиімді екенін көрсетеді. Бұл теңгерім энергияны тұтынуды тиімді қолдана отырып, шикізатты бағалы жанама өнімге түрлендірудің тиімділігін ұсынады.

10-кестеде бу, май және электр энергиясының шығымына назар аударып, пиролиз жүйесінің технологиялық тиімділігі берілген.

Кесте 10. Процестің тиімділігін есептеу

Параметрлері/өнімнің шығымы	Бу	Май	Электр энергиясы, МВтч	Барлығы (бу, май)	Химиялық тиімділігі (май)	Энергиялық тиімділігі УТТ (бу, май)	Турбогенератордың тиімділігі (будың қуаттылығы)
Салмағы, кг	1428,5	108,3	393,9	-	-	-	-
Жылу, ГДж	4,727	3,882	1,418	8,609	-	-	-
Тиісінше, %	45,7	37,6	13,7%	83,29	37,56	83	30

Өндірілетін жылудың басым бөлігі бу мен мұнайдан алынады, будың үлесі 4,727 гДж және мұнайдың үлесі 3,882 гДж, сәйкесінше жалпы үлестің 45,7% және 37,6% құрайды. 393,9 кг шикізаттан өндірілетін электр энергиясы жалпы жылу үлесінің 13,7%-ын құрайды, ол 1,418 гДж болады. Бу мен мұнайдан алынған жылу шығымын біріктірген кезде 8,609 гДж құрайды, бұл жалпы қажетті жылудың 83,29%-ы. Сондай-ақ кестеде мұнайдың химиялық тиімділігі 37,56% және бу мен майға арналған УТТ көрсеткіштері жүйесінің энергия тиімділігі 83% болатыны көрсетілген. Бұл мәндер ТҚҚ өңдеу процесінде алынған жылу мөлшерін энергия көзі ретінде қолданудың тиімді екенін дәлелдейді.

4. Талдау

Пиролиз процесінің қалдықтарды тікелей жағудан айырмашылығы, диоксиндердің (тетрахлордibenзо-р-диоксиндер) түзілуіне жол бермейді. Бұл күрделі процестерге қойылатын талаптарды айтарлықтай төмендетеді. Қалдықтарды жағу кезінде хлор, оттегі және бензол жану камерасында бірге сақталады, бұл диоксиндердің – өте улы қосылыстардың түзілуіне әкеледі. ЕО-ның қалдықтарды жағу жөніндегі директивасы диоксиндердің ыдырауын қамтамасыз ету үшін түтін газдарын 1200°C температурада кем дегенде 2 секунд ұстауды қажет. Осыдан кейін газды бөлу мен тазартудың, сондай-ақ бөлінген газдарды салқындатудың жетілдірілген жүйесіне жіберу қажет.

Мысалы, түтін газының жылдамдығы 50-100 м/с болғанда, өртеу қондырғысының ұзындығы 100-200 метрді құрауы керек, бұл қосымша отын мен ауаны беруді қажет етеді.

Сонымен қатар, өртеу қондырғысы мен газды бөлу жүйесінің ішкі беттері қымбат бағалы отқа төзімді материалдармен қапталуы керек, бұл айтарлықтай көп шығындарға әкеледі.

Пиролиз реакторында хлор мен бензол болғанымен, диоксин синтезіне жол беретін оттек жоқ. Пиролиз процесінде түзілген бензол реактордан бу-газ қоспасымен бірге шығарылады. Содан кейін алынған жартылай кокс ауа-фонтанды пешке жіберіледі, онда хлор мен оттек бар, бірақ бензол жоқ. Ауа-фонтанды пеште хлор кальциймен байланысып, зиянсыз кальций хлоридін (CaCl_2) түзеді, содан кейін ол күлмен бірге жойылады. Демек, диоксиндерді ыдырату үшін қымбат құрал-жабдықтардың қажеті жоқ.

Тұрмыстық қатты қалдықтарды кәдеге жаратудың басқа технологияларынан біздің ұсынып отырған технологиямыздың төмендегідей артықшылықтары бар:

1. Меншікті өнімділігі жоғары (шикізат негізінде жылына 200 мыңнан 1,5 млн тоннаға дейін).
2. Пеште бұдан бұрын болған және жаңадан келіп түскен қатты қалдықтардың, өндірістік қалдықтардың, шламдар мен шөгінділердің алуан түрін әртүрлі қоспалар мен пропорцияларда өңдеуге болады.
3. Қалдықтардың барлығын қайта өңдеуге болады (қалдықсыз технология).
4. ТҚҚ-ды қайта өңдеу алдында сұрыптау талап етілмейді, тек қара және түсті металдар бөлінеді.

Пиролиз процесін жүргізудің қалдықтарды тікелей жағудан айырмашылығы диоксиндердің (тетрахлордибензодиоксиндердің) түзілуін болдырмайды. Бұл күрделі шығындардың көлемін бірнеше есе азайтады. Технологиялық процесс басқа өндірушілердің энергия тасымалдаушыларын талап етпейді. Процестің жеке қажеттіліктері қалдықтардың ықтимал жылуымен жабылады.

Шикізатты жеткізу жүйесіне орташа деңгейдегі жабық қойма, шикізатты ұсақтау/ұнтақтау, электромагниттік сепаратор арқылы қара металдарды шығару, құйынды ток сепараторы арқылы түсті металдарды бөлу және өңделген қалдықтарды әктаспен бірге ыстық күл араластырғышқа беру кіреді.

Өндірістің экологиялық көрсеткіштері ЕО талаптарына сәйкес келеді (мысалы, 3 қондырғы УТТ-3000 Кохтла-Ярве қаласында орналасқан, 2 қондырғы УТТ-500 Кивинемесе Эстонияда). Viru Keemia Grupp AS үш қондырғыны басқарады, ол Petroter Эстонияның Кохтла-Ярва қаласында. Бұл нысандар ЕО-тың экологиялық ережелеріне және «Эстониядағы жанғыш тақтатастарды өңдеудің ең тиімді технологиялары» анықтамалық құжатына сәйкес келеді (ВАТ) (Molis A. және т.б., 2018).

Кесте 11. Бір қондырғыдан атмосфераға тікелей түсетін жылдық шығарындылар

Шығарындылар	NO_2	CO	CO_2	SO_2
Түтін газдарындағы орташа концентрация, мг/м^3	186,1	179,8	208 826	691,7

Қалдықсыз технология – барлық пиролиз өнімдері коммерциялық (сұйық отын, электр және жылу энергиясы, күл) немесе технологиялық процесте (пиролиз газы, пиролиз процесінің артық жылуы) қолданылады. Алынған күл инертті болып табылады және құрылыс материалдарын, асфальтты, тыңайтқыштарды, ал балқыту кезінде одан ферроқорытпаларды және кальцийкарбидін алуға болады.

Ондаған миллион тонна қатты тұрмыстық қалдықтар, сондай-ақ қатты тұрмыстық қалдықтарды сұрыптаудан кейінгі «қалдық қоймалары» орналастырылған Астана қаласындағы (Қазақстан) өндірістік және ТҚҚ кәдеге жарату мүмкіндіктеріне ерекше назар аудару қажет. Жасалған технологиялық сұлбалар зауыт жұмысының тиімділігіне және жылу мен электр энергиясын тұтынудың маусымдық өзгерістеріне, қазандықтың сұйық отынына,

күл, өңдеу өнімдеріне (құрылыс материалдарына, феррокорытпаларға, асфальтбетон қоспаларына, тротуар плиталарына және т.б.) сұраныстың өсуіне жауап береді. Муниципалдық аумақтарда мұндай қондырғыларды салу (тәулігіне 500 т.) энергияның сарқылмайтын көзінің пайда болуына («қалдықтардан энергияға»), жылу мен электр энергиясына сұранысты қанағаттандыруға көмектеседі, осылайша жылыту маусымына отынды сатып алу және сақтау шығындарын азайтады және энергия құнын төмендетеді. Қалдықтарды энергия қажеттіліктерін жабу үшін пайдалану табиғи газды, көмірді және сұйық отынды қолданудың қажеттілігін болдырмайды. Артық жылу энергиясын жеміс-көкөніс өсіруге және кәсіпкерлікке арналған жылыжай шаруашылықтарын дамытуға пайдалануға болады. Қолданыстағы және жабылған полигондардағы бұрын жинақталған өнеркәсіптік және ТҚК жою, қалдықтардың санитарлық-қорғау аймақтарын алып жатқан жерлерді босатуға, бұрынғы полигондар астындағы топырақты тазартуға және залалсыздандыруға, бұл жерлерді шаруашылық иелігіне қайтаруға мүмкіндік береді.

УТТ қондырғыларының жұмысына қажетті барлық жабдықтарды Қазақстанда шығаруға болады. Қазақстанда жергілікті өндірілген жабдықты пайдалана отырып, УТТ нысандарын құру, ел үшін бірқатар экономикалық және стратегиялық артықшылықтарға жол ашады. Біріншіден, жергілікті өндірушілер арасындағы ынтымақтастық, көлік шығындары мен кедендік төлемдерді азайтуға мүмкіндік береді, осылайша жобаның экономикалық тиімділігін арттырады. Қазақстанда УТТ нысандарын орналастыру нәтижесінде туындайтын логистикалық шығындардың төмендеуі жобаның жалпы құнына қолайлы әсер етеді. Екіншіден, қазақстандық техниканы пайдалану Қазақстандағы әр түрлі аймақтар арасындағы экономикалық байланысты нығайтуға қызмет етеді. Мұндай ынтымақтастық өзара инвестицияларға, технологиялық алмасуға және Қазақстанда жаңа жұмыс орындарын құруға әкелуі мүмкін. Мұндай жобалар жергілікті өнеркәсіптің дамуына ықпал етеді және бірлескен кәсіпорындар құруды ынталандыруы мүмкін. Сол арқылы Қазақстан экономикасын әртараптандыруға ықпал етеді. Қорытындылай келе, құрал-жабдықтарды өндіру мүмкіндігі Қазақстанға УТТ нысандарын құру жобаларын жедел және тиімді бастауға мүмкіндік береді. Елде жоғары сапалы жабдықты шығару үшін қажетті тәжірибе мен технология бар, осылайша зауыттардың сенімділігі мен тиімділігіне кепілдік береді. Бұл өз кезегінде Қазақстанның энергетикалық тәуелсіздігін арттыруға және ел үшін аса маңызды стратегиялық маңызы бар өнеркәсіптерді құруға қызығушылық тудырады.

УТТ қондырғыларын салу және пайдалану полигондардан парниктік және полигон газдарының атмосфераға шығарындыларын, жер асты суларының ластануын, қоршаған ортаға зиянды заттардың түсуін азайтады. УТТ технологиясы газ шығарындыларын азайту үшін қолданылатын басқа технологиялармен толық үйлеседі, қоқыс газдарын жинау үшін полигондарды гео-пленкалармен жабуды, рекультивациялауды және иістерді жою үшін полигондарды әктас және топырақ қабаттарымен жабуды жоққа шығармайды. УТТ негізіндегі қалдықтарды өңдейтін зауыттардың экономикалық тиімділігі жоғары. Қазақстанда мұндай зауыттар желісін дамыту жобалық қаржыландыру қағидаттары бойынша салынған зауыттар қалыптастыратын ақша ағындары есебінен жүзеге асырылуы мүмкін.

5. Қорытынды

Осы зерттеу жұмысы бойынша алынған нәтижелер ТҚК өңдеуді жақсарту үшін қатты жылу тасымалдаушысы бар жылдам пиролиз технологиясының маңызды екенін көрсетеді. Біздің жан-жақты техно-экономикалық талдауымыз бұл әдістің дәстүрлі өртеуден айтарлықтай артықшылықтары бар екенін көрсетеді, соның ішінде зиянды шығарындыларды азайтуды және әртүрлі қалдықтарды өңдеуде үлкен икемділік беретінін көрсетеді. Жылдам пиролиз процесі қалдықтарды синтетикалық мұнай, газ, жылу және электр энергиясы, құрылыс материалдары және феррокорытпалар сияқты құнды өнімдерге тиімді түрлендіреді, ресурстарды қайта пайдалануға және энергия өндіруге ықпал етеді.

Бастапқыда жанғыш тақтатастарды өңдеу үшін әзірленген бұл технологияның ТҚҚ өңдеуге сәтті бейімделуі, оның сенімділігі мен тиімділігін көрсетеді. УТТ-500 және УТТ-3000 қондырғыларының пайдалану көрсеткіштері, қондырғылардың қоршаған ортаға тигізетін әсерін барынша азайта отырып, өздерінің энергия қажеттіліктерін қанағаттандыра алатынын көрсетеді. Алынған нәтижелер қала маңындағы қалдықтарды жою бойынша ең басты маңызды мәселелерді шешу үшін қалдықтарды өңдеудің озық технологияларын енгізудің маңыздылығын атап көрсетеді.

Қорытындылай келе, қатты жылу тасымалдаушысы бар жылдам пиролиз технологиясы ТҚҚ өңдеуге перспективалы және тұрақты балама болып табылады. Оның бірнеше құнды өнімдерді шығару және экономикалық жағынан тиімділігі, оны қалдықтарды өңдеудің заманауи жүйелері үшін көп жылдар бойы қолдауға болатынын дәлелдейді. Болашақ зерттеулер мен әзірлемелер осы технологияны одан әрі оңтайландыруға және қалдықтарды өңдеудің жалпы тиімділігі мен экологиялық тұрақтылықты арттыру үшін осы процесті қалдықтардың басқа түрлерінеде қолдануды зерттеуге бағытталуы керек.

6. Қосымша материалдар: қосымша материалдар жоқ.

7. Авторлық үлестер

Концептуализация – Е.А.; әдістеме – Н.Н.; бағдарламалық қамтамасыз ету – А.К., Л.К., Т.М.; тексеру – Ж.И., Н.Н.; формальды талдау – Ж.И., А.К.; тергеу – Ж.И.; ресурстар – Ж.И.; деректер кураторы – А.К.; жазу – түпнұсқа жоба – Р.С., Е.А.; жазу – рецензиялау және редакциялау – А.К., Ж.И., Е.А., Н.Н.; визуализация – Ж.И., Н.Н.; қадағалау – Е.А.; жобаны басқару – Е.А.; әдістеме – Н.Н.; бағдарламалық қамтамасыз ету – Е.А.; қаржыландыруды сатып алу – Е.А.

8. Автор туралы ақпарат

Айбульдинов Еламан Канатович – бас ғылыми қызметкер, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университетінің Жаңа химиялық технологиялар ғылыми-зерттеу институты; Ғылым және сыртқы байланыстар жөніндегі проректор, К. Кулажанов атындағы Қазақ технология және бизнес университеті, Қажымұқан көш., 13, Астана, Қазақстан, 010008; elaman@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9143-4581>

Нургалиев Нуркен Утеуович – қауымдастырылған профессор (доцент), «К. Кулажанов атындағы Қазақ технология және бизнес университеті» АҚ, химия, химиялық технология және экология кафедрасы, К.Мухаметханов көш. 37 А, Астана, Қазақстан, 010008; nurgaliev_nao@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9171-2238>

Сафаров Руслан Заирович – зерттеуші-оқытушы, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, жаратылыстану ғылымдары факультетінің химия кафедрасы, Қажымұқан көш., 13, Астана, Қазақстан, 010008; safarov_rz@enu.kz, <https://orcid.org/0000-0003-2158-6330>

Искакова Жанар Бактыбаевна – директор, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университетінің Жаңа химиялық технологиялар ғылыми-зерттеу институты, Қажымұқан көш., 13, Астана, Қазақстан, 010008; iskakova_zhb@enu.kz, <https://orcid.org/0000-0002-4434-0707>

Колпек Айнагул – доцент, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, жаратылыстану ғылымдары факультетінің химия кафедрасы, Қажымұқан көш., 13, Астана, Қазақстан, 010008; kolpek_a@enu.kz, <https://orcid.org/0000-0001-6188-6229>

Машан Тогжан Тургалиевна – профессор м.а., Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, жаратылыстану ғылымдары факультетінің химия кафедрасы, Қажымұқан көш., 13, Астана, Қазақстан, 010008; mshan_tt@enu.kz, <https://orcid.org/0000-0001-7598-1956>

Кусепова Лязат Аманжоловна – доцент, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, жаратылыстану ғылымдары факультетінің химия кафедрасы, Қажымұқан көш., 13, Астана, Қазақстан, 010008; kusepova_la@enu.kz, <https://orcid.org/0000-0002-6457-0999>

9. Қаржыландыру: Бұл зерттеуді Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігінің Ғылым комитеті қаржыландырды (грант № BR21882171).

10. Алғыстар: Біз ConsultTech ЖШС, Роман Ладуренко директоры атынан, зерттеудегі технологиялық есептеулердің кәсіби консалтингтік барысы үшін шын жүректен алғысымызды білдіргіміз келеді. Бұл жобаны жүзеге асыруда олардың тәжірибесі мен адалдығы маңызды рөл атқарды.

11. Мүдделер қақтығысы: Авторлар мүдделер қақтығысы жоқ деп мәлімдейді. Демеушілер зерттеуді әзірлеуде ешқандай рөл атқарған жоқ; деректерді жинауда, талдауда немесе түсіндіруде; қолжазбаны жазуда; немесе нәтижелерді жариялау туралы шешім қабылдауда.

12. Әдебиеттер тізімі

1. Asadullah, M., Ab Rasid, N. S., Kadir, S. A., & Azdarpour, A. (2013). Production and detailed characterization of bio-oil from fast pyrolysis of palm kernel shell. *Biomass and Bioenergy*, 59, 316–324. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2013.08.037>
2. Asif, M., Laghari, M., Abubakar, A. M., Suri, S. K., Wakeel, A., & Siddique, M. (2025). Review on Municipal Solid Waste, Challenges and Management Policy in Pakistan. *Portugaliae Electrochimica Acta*, 43(4), 249–258. <https://doi.org/10.4152/pea.2025430404>
3. Assi, A., Bilo, F., Zanoletti, A., Ponti, J., Valsesia, A., La Spina, R., Zacco, A., & Bontempi, E. (2020). Zero-waste approach in municipal solid waste incineration: Reuse of bottom ash to stabilize fly ash. *Journal of Cleaner Production*, 245, 118779. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118779>
4. Cui, W., Wei, Y., & Ji, N. (2024). Global trends of waste-to-energy (WtE) technologies in carbon neutral perspective: Bibliometric analysis. *Ecotoxicology and environmental safety*, 270, 115913. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2023.115913>
5. Farzadkia, M., Mahvi, A. H., Norouziyan Baghani, A., Sorooshian, A., Delikhoon, M., Sheikhi, R., & Ashournejad, Q. (2021). Municipal solid waste recycling: Impacts on energy savings and air pollution. *Journal of the Air & Waste Management Association (1995)*, 71(6), 737–753. <https://doi.org/10.1080/10962247.2021.1883770>
6. Gerasimov, G., Khaskhachikh, V., Potapov, O., Dvoskin, G., Kornileva, V., & Dudkina, L. (2019). Pyrolysis of sewage sludge by solid heat carrier. *Waste Management*, 87, 218–227. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.02.016>
7. Guan, D., Zhao, J., Wang, Y., Fu, Z., Zhang, D., Zhang, H., Xie, J., Sun, Y., Zhu, J., & Wang, D. (2024). A critical review on sustainable management and resource utilization of digestate. *Process safety and environmental protection*, 183, 339–354. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2024.01.029>
8. Kasiński, S., & Dębowski, M. (2024). Municipal Solid Waste as a Renewable Energy Source: Advances in Thermochemical Conversion Technologies and Environmental Impacts. *Energies*, 17(18), 4704. <https://doi.org/10.3390/en17184704>
9. Kaza, S., Yao, L.C., Bhada-Tata, P., Van Woerden, F., & Thierry Michel Rene, M. (2018). What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050. Washington, DC: World Bank. <https://doi.org/10.1596/978-1-4648-1329-0>
10. Kowalski, Z., Makara, A., Kulczycka, J., Generowicz, A., Kwaśnicki, P., Ciula, J., & Gronba-Chyła, A. (2024). Conversion of Sewage Sludge into Biofuels via Different Pathways and Their Use in Agriculture: A Comprehensive Review. *Energies*, 17(6), 1383. <https://doi.org/10.3390/en17061383>

11. Kumar, R., Sharma, S., Kumar, A., Singh, R., Awwad, F. A., Khan, M. I., & Ismail, E. A. A. (2024). Sustainable energy recovery from municipal solid wastes: An in-depth analysis of waste-to-energy technologies and their environmental implications in India. *Energy Exploration & Exploitation*, 43(1), 3–28. <https://doi.org/10.1177/01445987231210323>
12. Li, N., He, M., Lu, X., Yan, B., Duan, X., Chen, G., Wang, S., & Hou, L. (2022). Municipal solid waste derived biochars for wastewater treatment: Production, properties and applications. *Resources conservation and recycling*, 177, 106003. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.106003>
13. Liang, Y., Xu, D., Feng, P., Hao, B., Guo, Y., & Wang, S. (2021). Municipal sewage sludge incineration and its air pollution control. *Journal of Cleaner Production*, 295, 126456. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126456>
14. Liu, J., Kua, H. W., Wang, C.-H., Tong, Y. W., Zhang, J., & Peng, Y. (2023). Improving urban ecosystem holistic sustainability of municipal solid waste-to-energy strategy using extended exergy accounting analysis. *Science of the Total Environment*, 904, 166730. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.166730>
15. Louzizi, T., Chakir, E., & Sadoune, Z. (2024). A comprehensive review on solid waste management in Morocco: Assessment, challenges and potential transition to a circular economy. *Euro-Mediterranean Journal for Environmental Integration*. <https://doi.org/10.1007/s41207-024-00662-5>
16. Ma, J., & Hipel, K. W. (2016). Exploring social dimensions of municipal solid waste management around the globe - A systematic literature review. *Waste Management (New York, N.Y.)*, 56, 3–12. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.06.041>
17. Moradi, R., Yazdi, M., Haghghi, A., & Nedjati, A. (2024). Sustainable resilient E-waste management in London: A circular economy perspective. *Heliyon*, 10(13), e34071. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e34071>
18. Narayana Sarma, R., & Vinu, R. (2023). An assessment of sustainability metrics for waste-to-liquid fuel pathways for a low carbon circular economy. *Energy Nexus*, 12, 100254. <https://doi.org/10.1016/j.nexus.2023.100254>
19. Nassajfar, M. N., Abdulkareem, M., Horttanainen, M. (2024). End-of-life options for printed electronics in municipal solid waste streams: A review of the challenges, opportunities, and sustainability implications. *Flexible and Printed Electronics*, 9(3), 033002. <https://doi.org/10.1088/2058-8585/ad699b>
20. Potapov, O. P. (2016). Experience and prospects of oil shale utilization for power production in Russia. *Thermal Engineering*, 63(9), 643–647. <https://doi.org/10.1134/S0040601516080097>
21. Potapov, O. P., Khaskhachikh, V. V., Gerasimov, G. Y. (2017). State-of-the - Art technologies of oil shale thermal processing. *Journal of Physics: Conference Series*, 891, 12236. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/891/1/012236>
22. Rauch, R., Kiros, Y., Engvall, K., Kantarelis, E., Brito, P., Nobre, C., Santos, S. M., & Graefe, P. A. (2024). Hydrogen from Waste Gasification. *Hydrogen*, 5(1), 70–101. <https://doi.org/10.3390/hydrogen5010006>
23. Razzak, S.A. (2024). Municipal Solid and Plastic Waste Co-pyrolysis Towards Sustainable Renewable Fuel and Carbon Materials: A Comprehensive Review. *Chemistry-an asian journal*, 19(17), e202400307. <https://doi.org/10.1002/asia.202400307>
24. Ren, Z., & Zuo, G. (2024). Challenges of Implementing Municipal Solid Waste Separation Policy in China. *Sustainability*, 16(18), 8081. <https://doi.org/10.3390/su16188081>
25. Sarker, T. R., Ethen, D. Z., Asha, H. H., Islam, S., & Ali, Md. R. (2024). Transformation of municipal solid waste to biofuel and bio-chemicals - A review. *International journal of environmental science and technology*, 22, 3811–3832. <https://doi.org/10.1007/s13762-024-05975-0>
26. Sharma, P., Bano, A., Singh, S. P., Varjani, S., & Tong, Y. W. (2024). Sustainable Organic Waste Management and Future Directions for Environmental Protection and

- Techno-Economic Perspectives. *Current Pollution Reports*, 10(3), 459–477. <https://doi.org/10.1007/s40726-024-00317-7>
27. Traven, L. (2023). Sustainable energy generation from municipal solid waste: A brief overview of existing technologies. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 8, 100491. <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2023.100491>
28. Tugov, A. N., Ots, A., Siirde, A., Sidorkin, V. T., & Ryabov, G. A. (2016). Development of measures to improve technologies of energy recovery from gaseous wastes of oil shale processing. *Thermal Engineering*, 63(6), 430–438. <https://doi.org/10.1134/S0040601516060082>
29. Vanchurin, V., Wolf, Y. I., Katsnelson, M. I., & Koonin, E. V. (2022). Toward a theory of evolution as multilevel learning. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 119(6), e2120037119. <https://doi.org/10.1073/pnas.2120037119>
30. Vinnichenko, V., Shul'Ga, I., & Saffioti, P. (2023). *Ecological feasibility of pyrolysis in comparison with the incineration of municipal solid waste*, 2490(1), 050006. <https://doi.org/10.1063/5.0151894>
31. Volkov, E.P., & Stelmahh, G.F. (1999). The Stages of Research on Creating Commercial Units for Processing Oil Shale Fines: Development of the “Galoter” Process in 1944–1999. *Oil Shale*, 16(2), 161–185. <https://doi.org/10.3176/oil.1999.2.08>
32. Vukovic, N., & Makogon, E. (2022). Waste-to-Energy Generation: Complex Efficiency Analysis of Modern Technologies. *Sustainability (Switzerland)*, 14(21), 13814. <https://doi.org/10.3390/su142113814>
33. Wang, J., & Wang, S. (2019). Preparation, modification and environmental application of biochar: A review. *Journal of cleaner production*, 227, 1002–1022. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.282>
34. Yorgun, S., & Yildiz, D. (2015). Slow pyrolysis of paulownia wood: Effects of pyrolysis parameters on product yields and bio-oil characterization. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 114, 68–78. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2015.05.003>
35. Zhang, Y., Wang, L., Chen, L., Ma, B., Zhang, Y., Ni, W., Tsang, D. C. W. (2021). Treatment of municipal solid waste incineration fly ash: State-of-the-art technologies and future perspectives. *Journal of Hazardous Materials*, 411, 125132. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.125132>
36. Zhou, W., Chai, J., Xu, Z., Qin, Y., Cao, J., & Zhang, P. (2024). A review of existing methods for predicting leachate production from municipal solid waste landfills. *Environmental Science and Pollution Research*, 31(11), 16131–16149. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-32289-y>

Fast Pyrolysis Technology with Solid Heat Carrier for Municipal Solid Waste Processing

Yelaman Aibuldinov, Nurken Nurgaliev, Ruslan Safarov, Zhanar Iskakova, Ainagul Kolpek, Togzhan Mashan, Lyazat Kusepova

Abstract: Municipal solid waste (MSW) recycling is critical in addressing the environmental challenges posed by increasing urbanization and waste generation. This study explores the use of fast pyrolysis technology with solid heat carriers for efficient MSW processing. The technology, originally developed for oil shale processing, involves the thermal decomposition of waste in an oxygen-free environment using its own ash as a heat carrier. This method produces valuable outputs, including synthetic oil, gas, thermal and electrical energy, construction materials, and ferroalloys. The study conducts a comprehensive techno-economic analysis of fast pyrolysis plants with

capacities of 150 000 tons/year (UTT-500) and 1 000 000 tons/year (UTT-3000), assessing their technical feasibility, economic viability, and environmental performance. Results indicate that this technology can significantly reduce harmful emissions compared to traditional incineration and offers greater versatility in processing various waste types. The findings support the potential of fast pyrolysis to enhance MSW management, aligning with circular economy principles and contributing to sustainable waste management practices. This research underscores the need for innovative solutions to improve recycling efficiency and reduce environmental impact, addressing the growing waste management challenges in urban settings.

Keywords: Municipal Solid Waste (MSW); Fast Pyrolysis; Solid Heat Carrier; Waste-to-Energy; Techno-Economic Analysis.

Технология быстрого пиролиза с твердым теплоносителем для переработки твердых бытовых отходов

Еламан Айбульдинов, Нуркен Нургалиев, Руслан Сафаров, Жанар Искакова, Айнагул Колпек, Тогжан Машан, Лязат Кусепова

Аннотация: Переработка твердых бытовых отходов (ТБО) имеет важное значение для решения экологических проблем, вызванных растущей урбанизацией и образованием отходов. В данной работе исследовано применение технологии быстрого пиролиза с твердыми теплоносителями для эффективной переработки ТКО. Технология, изначально разработанная для переработки сланца, предполагает термическое разложение отходов в бескислородной среде с использованием собственной золы в качестве теплоносителя. Этот метод дает ценную продукцию, в том числе синтетическую нефть, газ, тепловую и электрическую энергию, строительные материалы и ферросплавы. В ходе исследования проведен комплексный технико-экономический анализ установок быстрого пиролиза производительностью 150 000 тонн/год (УТТ-500) и 1 000 000 тонн/год (УТТ-3000), оценена их техническая целесообразность, экономическая целесообразность и экологические показатели. Результаты показывают, что эта технология может значительно снизить вредные выбросы по сравнению с традиционным сжиганием и обеспечивает большую универсальность при переработке различных типов отходов. Результаты подтверждают потенциал быстрого пиролиза для улучшения управления ТБО, соответствующего принципам экономики замкнутого цикла и способствуя устойчивым практикам управления отходами. Это исследование подчеркивает необходимость инновационных решений для повышения эффективности переработки и снижения воздействия на окружающую среду, решая растущие проблемы управления отходами в городских условиях.

Ключевые слова: твердые бытовые отходы (ТБО); быстрый пиролиз; твердый теплоноситель; преобразование отходов в энергию; технико-экономический анализ.