

## Використання органічних відходів цукробурякового виробництва як альтернативного палива

**О.О. Серьогін**, професор, доктор технічних наук, завідувач кафедри теоретичної механіки і ресурсоощадних технологій, Національний університет харчових технологій

**О.О. Осмак**, асистент кафедри теоретичної механіки і ресурсоощадних технологій, Національний університет харчових технологій

**А.С. Язєв**, завідувач відділом ПАТ «Луганськдїпрошахт»

**С.З. Ягудін**, головний конструктор Державного підприємства «Харківський завод транспортного машинобудування імені В.А. Малишева»

12

У статті розглянута можливість утилізації та переробки в енергоресурси відходів біомаси цукрових заводів за допомогою термохімічного синтезу. Наведено технологічні схеми та обладнання для отримання генераторного газу, що використовується на цукрових заводах, замість імпортованого природного газу для отримання теплової та електричної енергії.

*Ключові слова:* термохімічний синтез, синтез-газ, газифікація органічної сировини.

В статье рассмотрена возможность утилизации и переработки в энергоресурсы отходов биомассы свеклосахарных заводов посредством термохимического синтеза. Приведены технологические схемы и оборудование для получения генераторного газа, используемого на сахарных заводах, взамен импортного природного газа для получения тепловой и электрической энергии.

*Ключевые слова:* термохимический синтез, синтез-газ, газификация органического сырья.

*The possibility of recovery and recycling of waste biomass in the energy beet plants via thermo-chemical synthesis. The technological schemes and equipment for generating gas, used in sugar factories to replace imported natural gas to produce heat and electricity.*

*Key words:* catalytic combustion synthesis, synthesis gas, gasification of organic materials.

Аналіз можливих шляхів зниження витрат на випуск товарної продукції цукрових заводів показує, що з чотирьох, найбільш важливих елементів собівартості, таких як: амортизація, матеріали, зарплата і енерговитрати не представляється можливим різко зменшити витрати по перших трьох елементах, тому, що обладнання та витратні матеріали потрібно купити, а мінімальний рівень зарплати обмежений законодавчо. Залишається тільки один шлях - радикальне зниження витрат на теплову та електричну енергію. Для здійснення даної мети доцільним є будівництво автономної теплоелектростанції з внутрішньоцикловою газифікацією органічних відходів бурякоцукрового виробництва в суміші з низькоякісним вугіллям вітчизняного виробництва.

Свого часу, для газифікації різного палива в СРСР, були розроблені і експлуатувалися різноманітні газогенераторні установки, які конструктивно адаптувалися для досягнення конкретних експлуатаційних задач: отримання паливного газу, електроенергії, синтез-газу і т.д.

На жаль, за час використання дешевих нафтогазових продуктів, технології газифікації вугілля практично ніде не застосовувалися. У ниніш-

ніх умовах загострення паливного дефіциту виникають економічні передумови доцільності використання зазначених технологій для енергозабезпечення вугільних підприємств за допомогою когенераторів, двигунів внутрішнього згоряння, які працюють на генераторному газі, отриманому з сумішей біомаси та відсівів вугілля.

Використання когенерації з внутрішньоцикловою газифікацією сумішей для цукрового заводу в ремонтний період доцільно з наступних причин:

1. Абсолютна енергетична незалежність.

2. Можливість диверсифікації виробництва шляхом організації випуску нових видів продукції на базі дешевих тепла та електроенергії.

3. Використання традиційних відходів виробництва цукрової промисловості, таких як, бадилля, відходи вугілля після газової печі, хвостики, жом, фільтраційний осад, відпрацьовані гумово-технічні вироби, спецодяг, пально-мастильні матеріали, електроліти, тверді побутові відходи (міські або очисних споруд) для вироблення генераторного газу і випуску різних товарів.

4. Використання відходів органічного походження інших галузей, наприклад, сільського господарства, комунально-побутового, нафтохімічної і т.д.

5. Зниження негативного впливу на навколишнє природне середовище і, як наслідок, зменшення екологічних платежів.

6. Створення нових робочих місць.

**Газифікація твердого палива. Механізм основних реакцій процесу газифікації.** Газифікація – термохімічний процес взаємодії вуглецю палива з окислювачами, що проводиться з метою отримання горючих газів ( $H_2$ ,  $CO$ ,  $CH_4$ ). В якості окислювачів, які іноді називають газифікуючими агентами, використовують повітря, кисень (або збагачений їм повітря), водяна пара, діоксид вуглецю або суміші зазначених речовин. В залежності від співвідношення вихідних реагентів, температури, тривалості реакції та інших факторів, можна отримувати газові суміші самого різного складу.

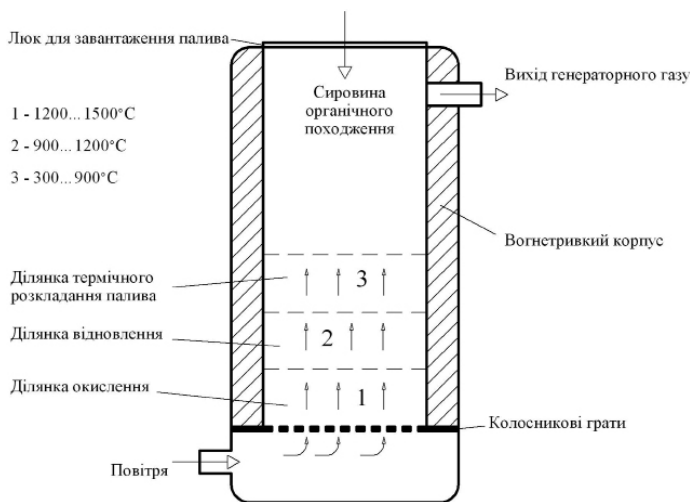


Рис. 1. Схема газогенератора прямого процесу газифікації

Вперше промислова реалізація газифікації твердого палива була здійснена в 1835 р. у Великобританії. До середини ХХ століття цей процес отримав широкий розвиток в більшості промислових країн світу. Наприклад, в СРСР в 50-і роки минулого століття працювало понад 350 газогенераторних станцій, на яких було встановлено близько 2500 газогенераторів. Ці станції виробляли щорічно 35 млрд. м<sup>3</sup> енергетичних і технологічних газів. Як відомо в наступні 20-25 років у світовому енергетичному балансі відбувалися зміни, зумовлені зростанням видобутку та споживання нафти, попутних і природних газів. Внаслідок цього, конкурентоспроможність штучних енергетичних і технологічних газів, одержуваних з твердого палива, різко знизилася, а їх виробництво, практично повсюдно (за винятком ПАР) було припинено.

Однак в останні роки, у зв'язку зі скороченням ресурсів нафтової і газової сировини, процес газифікації твердих горючих копалин, в суміші з біомасою, знову привернув до себе увагу, штучні гази знову починають розглядатися як одна з істотних складових теплового балансу.

Процес газифікації залежить від багатьох факторів, що впливають на склад отриманого газу

і його теплоту згоряння. До цього часу відсутня єдина загальноприйнята класифікація методів здійснення даного процесу, нижче наведено один із можливих варіантів класифікації.

По виду дуття (газифікуючих агентів): повітряне, повітряно-кисневе, пароповітряної, паро-кисневе, з використанням  $CO_2$ .

У напрямку руху потоку палива і дуття: – прямого – **рис. 1** – (паливо рухається зверху вниз генератора, а гази дуття – знизу вверх) і оберненого процесу – **рис. 2** – (паливо рухається зверху вниз, а гази дуття, так же зверху вниз).

Причому газогенератори оберненого процесу будувалися в основному для забезпечення роботи двигунів внутрішнього згоряння автомобілів (130 000 одиниць в СРСР), тракторів, електро-

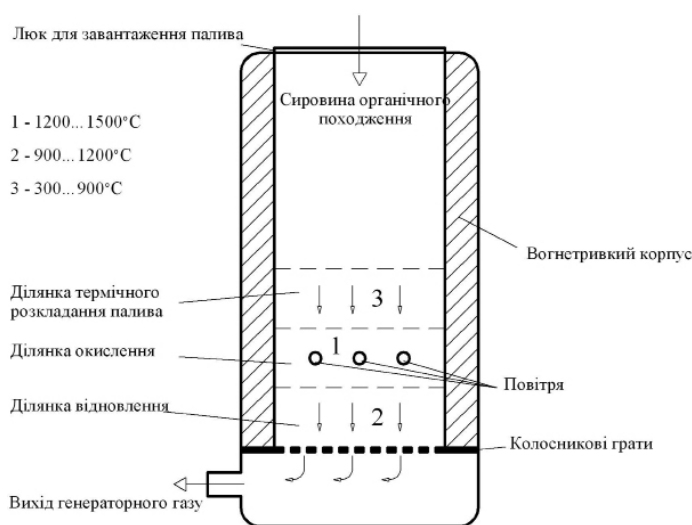


Рис. 2. Схема газогенератора оберненого процесу газифікації

станцій. Завод ім. Малишева (колишній Харківський паровозобудівний завод) випускав газогенераторні тепловози потужністю 2000 к.с., паливом для яких служив антрацит шахт тресту «Свердловуголь». Конструктивно газогенератори оберненого процесу мають меншу металоємність, допускається застосування широкого спектра палива за розміром (від 150-100 мм до пилу), зольністю (до 60 %) і особливо за вологістю (50-60%), які можуть працювати як під надлишковим тиском, так і під розрядженням, мають можливість цілеспрямованого введення газів і каталізаторів горіння палива, без істотних змін конструкції, можуть бути переведені на видалення золи або шлаку в розплавленому вигляді, при застосуванні парового дуття не вимагають спеціальних пароутворювачів з системою водопідготовки і т.д.

За тиском: атмосферного тиску, підвищеного тиску.

За розміром частинок палива: газифікація суміші біомаси з грубозернистим (кусковим), дрібнозернистим і пилоподібним паливом.

За конструктивними особливостями реакторної зони: з нерухомим щільним шаром палива, з псевдозрідженим (киплячим) шаром палива, з пилувугільним, водовугільним факелом.

За способом виведення золи: в твердому вигляді, у вигляді рідкого шлаку.

За способом підведення тепла: при частковому спалюванні палива в газогенераторі, при змішуванні палива з попередньо нагрітим твердим, рідким або газоподібним теплоносієм (регенеративний нагрів), «CO<sub>2</sub> - акцептор», при підводі тепла через стінку апарату (рекуперативних нагрів). За призначенням отриманого газу: отримання газів із заданою теплотою згоряння (низькою – до 6700 кДж/м<sup>3</sup>, середньої – від 12000 до 18000 кДж/м<sup>3</sup> і високою – від 30000 до 35000 кДж/м<sup>3</sup>); отримання газів заданого складу.

За способом збагачення кінцевого газу метаном: беззалишкова газифікація палива в CO, CO<sub>2</sub> і H<sub>2</sub> в поєднанні з окремою стадією метанування CO і CO<sub>2</sub> воднем; газифікація з повним виділенням летючих і максимальним утворенням метану в шарі палива; гідрогазифікація.

**Уніфікований газогенератор для газифікації твердого палива і різних відходів органічного походження.** В умовах ринкової економіки для забезпечення енергоносіями різних технологічних процесів доцільно використовувати в якості альтернативи природному газу та рідким нафтопродуктам генераторний газ, отриманий з низькосортного палива або відходів органічного походження, включаючи жом, бадилля, хвостики, особливо для вироблення електричної і теплової енергії в когенераторі.

Аналіз досвіду, накопиченого в країнах СНД і за кордоном, показує, що для газифікації різних видів палива розроблялися спеціальні газогенератори, що враховують конкретні властивості палива. Причому, особливі, найбільш жорсткі вимоги до якості генераторного газу, а також і до газогенератора, пред'являлися в разі використання отриманого газу як палива для двигунів внутрішнього згоряння.

З метою скорочення витрат на проектування і виготовлення газогенераторів виникла необхідність розробити конструкцію уніфікованого газогенератора для газифікації широкого спектра палива та відходів, що містять вуглеводні.

Відомо, що для живлення двигунів внутрішнього згоряння використовують генераторний газ, отриманий шляхом газифікації твердого палива в газогенераторах оберненого процесу. В таких газогенераторах повітря підводять в верхню або середню частині шахти через спеціальні отвори або фурми, розташовані в одному або кількох ярусах, де і відбуваються основні процеси газифікації палива, а генераторний газ відводять в нижній частині [1].

Рух газоповітряного потоку крізь пористу записку, якою по суті є суміш біомаси з вугіллям (вугілля, кокс, жом, гичка, хвостики), обумовлено законами аеродинамічної взаємодії газів і шару палива. Газоповітряний потік, потрапляючи в шар палива, розбивається на велику кількість окремих струменів, що рухаються по дуже складних траек-

торіях в дисперсному просторі суміші. Суміш палива є дисперсним середовищем каналів неправильної форми зі змінним перетином, багаторазово з'єднаних між собою.

Однією з найважливіших характеристик шару палива є коефіцієнт пористості, що встановлює відношення обсягу порожнеч до всього об'єму. Якщо шар палива в газогенераторі в зоні підведення повітря має різну пористість, то повітря спрямовується основною масою по шляху найменшого опору, утворює швидко вигоряючі місцеві осередки, і розподіл повітря по перетину різко змінюється. У зв'язку з малою теплопровідністю шару палива цей процес розвивається винятково швидко і створює нестійкість процесу газифікації, що призводить до погіршення якості одержуваного газу або, взагалі, припинення вироблення генераторного газу.

Зрозуміло, що на властивості шару палива істотний вплив надає і його висота, тому, що зміна останньої призводить до суттєвих змін аеродинамічних і термохімічних параметрів протікання реакцій газифікації.

Крім того, на хід процесу газифікації дуже впливають і такі характеристики палива, як вологість, хімічний склад мінеральної компоненти і легких речовин, спікаємість, температури переходу в пластичний стан і плавлення золи і т.п.

Вплив зазначених властивостей палива настільки значний, що для газифікації різних видів суміші палива виготовляються індивідуальні газогенератори, що істотно звужує сферу застосування цієї технології.

Отже, для організації сталого процесу газифікації сумішей палив різних видів, потрібно вирішити три основні завдання:

- забезпечення стійкості стану шару палива з необхідною і рівнорозподіленою пористістю;
- забезпечення подачі газів дуття заданого складу в такому напрямку і з такою граничною швидкістю між часточками, при яких структура шару не піддавалася б різким змінам;
- зміна висоти шару палива в залежності від його властивостей.

Для вирішення першого завдання відомі газогенератори в яких через спеціальні отвори у завантажувальному люку або верхній частині шахти спеціальними стержнями виконують прошарування шару палива [1]. Цю технологічну операцію проводять вручну, і при цьому вона пов'язана з втратами отриманого генераторного газу та його шкідливим впливом на обслуговуючий персонал.

Відомі газогенератори з шуруючими мішалками системи Чепман різних конструкцій [2]. Для розрівнювання і поверхневого прошарування вони мають спеціальні мішалки – шуруючі граблі, які представляють собою порожнистий, охолоджуваний водою, горизонтальний стержень з похилими змінними зубами-гребками, що оберта-



ється навколо вертикальної осі. Гребки занурені в поверхневий шар палива і при русі розпушують і вирівнюють його. Вертикальна вісь закріплена у втулці, встановленій на двох нерухомих лапах, і має на верхньому кінці гвинтову нарізку, за допомогою якої може автоматично підніматися і опускатися в межах 500-600 мм в залежності від висоти шару палива в шахті газогенератора.

Близькі за конструкцією до описаних газогенератори Тальбота, Дуффа, Сміта [3]. У газогенераторі Тальбота обертається мішалка, що складається з гладкої горизонтальної труби з жароміцної сталі без зубів. У газогенераторі Дуффа обертається верхня плита з двома прошуровуючими штангами, змонтованими на кульових муфтах. При обертанні плити штанги шурують верхній шар палива. У газогенераторі Сміта є дві мішалки, що працюють поперемінно.

У порівнянні з описаними, кращі показники газифікації мають механізовані газогенератори з обертовою шахтою системи Вельман [2], в яких здійснюється безперервне розрівнювання і шурування шару палива під впливом комбінованого руху спеціальної шуруючої арматури і обертанні шахти газогенератора. Газогенератор являє собою металеву футеровану шахту, яка звужується до низу. Кришка шахти має водяне охолодження. На ній є зубчастий вінець, до якого прикріплена рейка, що переміщується на шести горизонтальних опорних роликах, попарно закріплених на кронштейнах трьох опорних колон. На тих же колонах встановлені вертикальні ролики для запобігання зсуву шахти в горизонтальному напрямку. Для забезпечення герметичності між верхньою нерухомою кришкою і шахтою газогенератора встановлено гідравлічний затвор. Шахта газогенератора приводиться в рух від електродвигуна за допомогою конічного редуктора. При обертанні шахти частинки палива та шлаку захоплюються силою тертя, внаслідок чого вони зрушуються і частково перемішуються. Інтенсифікація перемішування шару палива досягається безперервним хитанням прошуровуючої арматури, вмонтованої в спеціальний тримач. Шуруюча арматура являє собою порожнисту водоохолоджувальну штангу, що приводиться в рух спеціальним приводом. Наконечник шуруючої арматури суцільний, знімний і замінюється по мірі зносу. При русі арматура шурує паливо, розпушуючи і розрівнюючи шар суміші по всьому перетину газогенератора. Завдяки тертю, що виникає між шматками палива і обмурівкою шахти, плівка золи на поверхні палива під час обертання шахти і роботи шуруючого пристрою постійно руйнується, оголюючи свіжу поверхню палива для газифікації. Як результат, по всьому перетину шахти підтримується рівномірна щільність верхньої частини шару палива.

Близькі за конструкцією до газогенератора Вельман газогенератори Вуда і Моргана [3]. На-

приклад, газогенератор Вуда забезпечений одним або двома охолоджуваними водою шуруючими ломками, які, занурюючись в шар палива, здійснюють коливальні рухи між центром і стінками шахти. Кожен лом розпушує при обертанні шар палива на глибину 450 мм. У газогенераторі Моргана, так само як і в вищенаведених конструкціях Вельман і Вуда, шахта обертається разом з зольною чашею, а верхня частина газогенератора монтується нерухомо. Вгорі газогенератора є один або два водоохолоджувані стержня-розрівнювачі, що мають вид перевернутої букви «П». Стержні-розрівнювачі, переміщуючись від центру газогенератора до стінки, здійснюють розрівнювання і ворушення палива, при цьому, вирівнюючи шар палива, що сприяє отриманню генераторного газу стабільного складу.

З вище викладеного випливає, що застосування цих мішалок дозволяє поліпшити стан тільки верхніх ділянок шару палива на глибину 450-600 мм, при загальній висоті шару більше 1000 мм. У той же час, глибинні високотемпературні ділянки, де проходять основні процеси газифікації палива, залишаються без належного впливу через неможливість забезпечення механічної міцності використовуваних елементів конструкцій шуруючих пристроїв.

Як наслідок, застосування таких шуруючих пристроїв призводить до значного збільшення металоемності і як наслідок подорожчання всього газогенератора. Ще більше ускладнюється конструкція через необхідність застосування водяного охолодження шуруючих пристроїв, що вимагає додаткових трубопроводів, ємностей, насосів, засобів водопідготовки та боротьби з накипом.

Для вирішення другого завдання можливе використання газогенератора розробки Центрального науково-дослідного дизельного інституту [4]. Підведення дуття в ньому здійснюють за допомогою фурм, розташованих в два яруси в середній частині шахти газогенератора, в спеціальній дуттєвій коробці, змонтованій на камері газифікації, що дозволяє поліпшити якість генераторного газу і зменшити витрату палива. Але основні завдання, визначені вище не вирішуються належним чином і в цьому конструктивному варіанті, так як шурування шару палива проводиться спонтанно, а гази дуття підводяться тільки в одному, строго фіксованому конструктивно, напрямку без можливості зміни їх хімічного складу.

Для вирішення третього завдання в жодній з відомих конструкцій газогенераторів немає можливості змінювати висоту шару газифікації, в залежності від зміни властивостей застосовуваного палива, при збереженні аеродинамічних характеристик.

В основу конструкторської розробки поставлена задача створення уніфікованого газогенератора здатного швидко адаптуватися для газифікації різ-

## ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ & ІННОВАЦІЇ

них видів сумішей твердого палива шляхом виконання газогенератора, що складається з наступних основних вузлів: подання і підготовки палива з дезінтеграторів парів води і летючих речовин; реактора; варіатора векторів дуття і шурування; відведення генераторного газу, подачі газів дуття; видалення осередкових залишків.

Рішення поставленої задачі досягається тим, що уніфікований газогенератор, який складається з вищевказаних вузлів, забезпечує оптимальні для проведення процесу газифікації конкретного виду палива параметри: кількість вологи і летких речовин, які направляються в зону газифікації, висоту і пористість шару, напрямок і інтенсивність шурування, і вектори підведення газів дуття, а так само їх хімічний склад. При цьому, є можливість плавної зміни висоти шару палива від мінімальної до максимальної у 10-11 разів.

Уніфікований газогенератор (див. рис 3.) Складається з бункера – 1, живильника – 2, шлю-

зової камери – 3, шахти піролізу – 4, з'єднаної трубопроводом – 5, з дезінтегратором парів води і летючих речовин – 6, реактора – 7, з вікнами – 8 для установки варіаторів векторів шурування і дуття – 9, дуттьової коробки – 10 з приводом варіаторів – 11, для видалення золи – 12, газової коробки – 1, колектора газового – 14, газової рубашки – 15, колектора дуттьових газів – 16, вентилятора дуттьового – 17, штуцерів подачі газів – 18, штуцера відводу генераторного газу – 19, і блоку каталізатора – 20.

Паливо з бункера – 1 подають живильником – 2 на підготовку до газифікації в шахту піролізу – 3 зовнішня стінка, якого є одночасно внутрішньою стінкою газової рубашки – 15. Одночасно з цим, в газову сорочку – 15 для утилізації фізичного тепла направляють вироблений генераторний газ. Під впливом тепла газу в паливі відбуваються процеси бертонування і піролізу з виділенням парів води і летючих речовин, що містяться в пали-

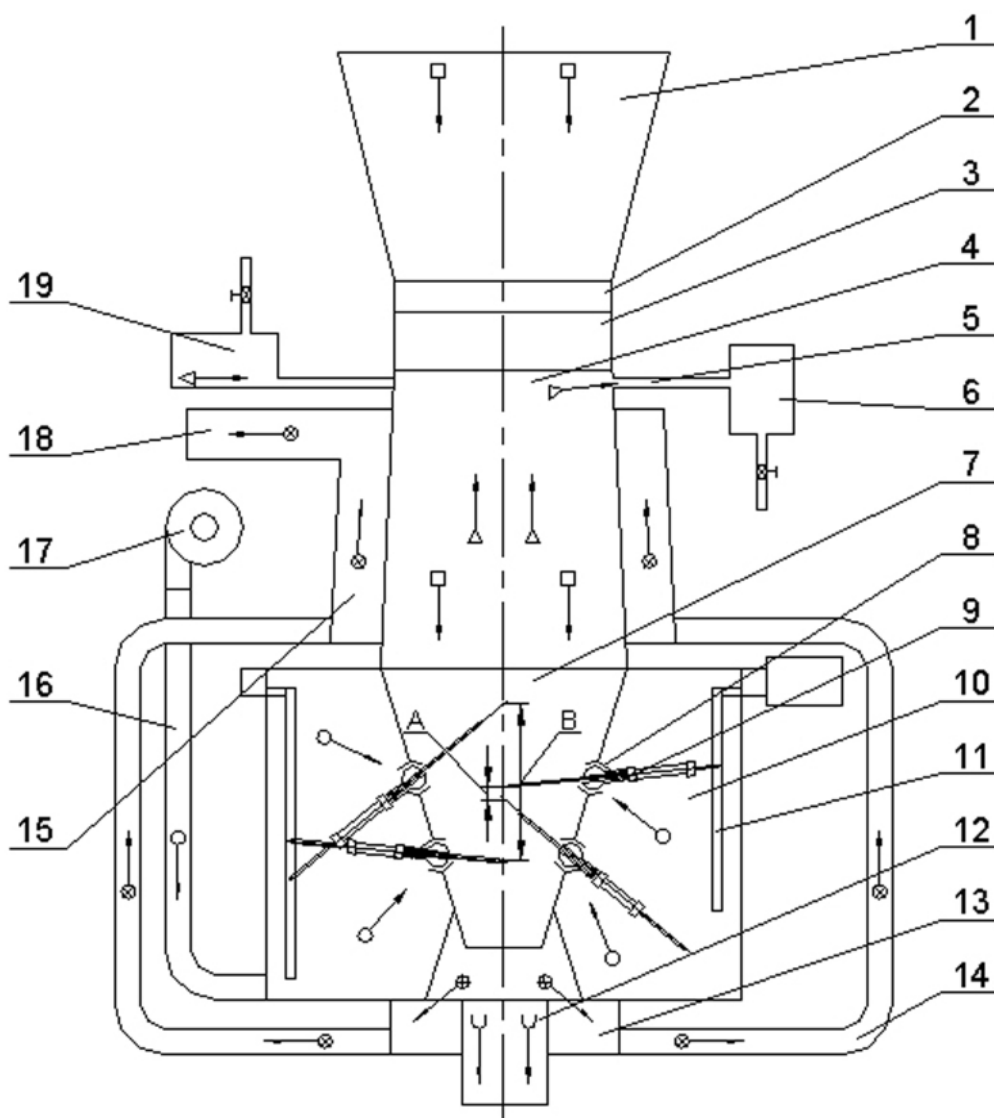


Рис. 3. Схема роботи газогенератора. Напрями рухів потоків:

- → палива,
- ▽ → води і летючих речовин (пар),
- △ → води (пар) і каталізатора,
- → газів дуття,
- ⊗ → генераторного газу,
- ⌋ → золи.

ві, які відводять з допомогою трубопроводу – 5 в дезінтегратор – 6 в якому пари конденсують і у вигляді води і піролізної смоли в необхідній кількості відводять з робочого обсягу газогенератора.

Після підготовки паливо подають в реактор – 7, де відбуваються термохімічні реакції газифікації при взаємодії розжареного вуглецю, газів дуття і каталізатора (при необхідності). Гази дуття надходять в дуттьову коробку – 10 по колектору дуттьових газів – 16. Причому, повітря нагнітають вентилятором – 17, а за допомогою штуцерів подачі газів – 18 подають кисень, вуглекислий газ, водяну пару і т.д. Потім гази дуття нагнітають під необхідним тиском в реактор – 7 через фурми варіаторів векторів дуття і шурування – 9, розташовані радіально в два або більше ярусів по вертикалі. Вектори дуття і шурування змінюють за допомогою приводу варіаторів – 11, кількість поданих газів дуття (повітря, вуглекислого газу, кисню, водяної пари і т.д.) регулюють дросельними заслінками, розташованими на колекторі дуттьових газів.

Отриманий генераторний газ відводять у газову коробку – 13, з якої по газовому колектору – 14, пройшовши охолодження в газовій рубашці – 15 останній направляють в штуцер відводу генераторного газу – 19.

Пропонований уніфікований газогенератор може працювати на будь-якій суміші органічного твердого палива, в порівнянні з прототипами, має більшу продуктивність на одиницю поперечного перерізу реакторної зони, забезпечує оптимальний хімічний склад і теплотворну здатність отриманого генераторного газу, а значить більш високий коефіцієнт корисного використання палива. Технічним результатом конструкторської розроб-

ки є забезпечення можливості використання сумішей твердого палива різних видів і пропорцій: жом, бадилля, хвостики, низькоякісний відсів вугілля, штиб, шлам, тирса, стружка, солома, обріз, насіння бур'янів, лушпиння, шкаралупа, папір, картон і т.д., в уніфікованому газогенераторі, конструкція якого захищена патентом [5].

Можливість цілеспрямованої зміни властивостей шару палива дає можливість отримання генераторного газу в режимі керованої оптимальної термохімічної реакції з максимально теплотворною здатністю. При цьому, за рахунок оптимізації параметрів процесу газифікації, знижується вміст шкідливих речовин в одержуваному газі і, як наслідок, шкідливий вплив на навколишнє середовище.

Газифікації можуть бути піддані, практично будь-які суміші біомаси з твердими горючими копалинами. При цьому можна отримати газ заданого складу або заданої теплоти згорання, так як ці показники значною мірою визначаються температурою, тиском і складом застосовуваного дуття.

Газ з низькою теплою згорання утворюється при використанні повітряного або пароповітряного дуття. Відповідно до цього його називають повітряним або пароповітряним (змішаним). Він характеризується високим вмістом баласту – азоту (до 40-55 % (об.)), що обумовлює низьку теплоту згорання такого газу. Основна область застосування таких газів - спалювання в топках промислових печей. Однак, після конверсії оксиду вуглецю та очищення від CO<sub>2</sub>, отримують азотоводневу суміш – вихідна сировина для синтезу аміаку.

Гази з середньою теплою згорання отримують в процесах парової або парокисневої газифі-

Таблиця 1

Процес	Продукт	Склад вихідного газу, % об.	Витрати на 1 т кінцевого продукту	Витрати твердого палива на 1 т кінцевого продукту, т у.п.
1 Синтез аміаку	Аміак	75 – H <sub>2</sub> , 25 – CO	2050 – H <sub>2</sub> + 685 CO	1,4
2 Синтез метанолу	Метанол	67 – H <sub>2</sub> , 33 – CO	1650 – H <sub>2</sub> + 825 CO	1,5
3 Оксосинтез	Альдегіди, спирти	50 – H <sub>2</sub> , 50 – CO	600 – H <sub>2</sub> + 600 CO	0,88
4 Синтез вуглеводів по Фішеру - Тропшу	Рідкі вуглеводні	33 – H <sub>2</sub> , 67 – CO	2000 – H <sub>2</sub> + 4000 CO	3,85
		67 – H <sub>2</sub> , 33 – CO	4000 – H <sub>2</sub> + 2000 CO	3,85
5 Пряме відновлення заліза	Залізна губка (92 % Fe)	33 – H <sub>2</sub> , 67 – CO	225 – H <sub>2</sub> + 450 CO	0,45
6 Гідрокрекінг вакуумного дистилату нафти	Бензин	100 – H <sub>2</sub>	500 – H <sub>2</sub>	0,02
7 Гідрування кам'яного вугілля	Рідкі вуглеводні	100 – H <sub>2</sub>	2070 – H <sub>2</sub>	0,27
8 Гідрування бурого вугілля	Рідкі вуглеводні	100 – H <sub>2</sub>	1620 – H <sub>2</sub>	0,16

кації твердого палива під тиском до 2-2,5 МПа. По складу вони представляють собою суміші оксидів вуглецю та водню з невеликими кількостями метану та інших вуглеводнів: 30-35 % (об.) CO<sub>2</sub>, 10-13 % (об.) CO, 38-40 % (об.) H<sub>2</sub>, 10-12 % (об.), CH<sub>4</sub>, 0,5-1,5 % (об.) C<sub>n</sub>H<sub>2n</sub>. З економічних міркувань такі гази застосовують в обмежених масштабах. Їх використовують головним чином як хімічну сировину, а також починають застосовувати в металургії в якості газів-відновників.

Характеристика виробництва різних продуктів на основі газів, одержуваних при газифікації суміші біомаси з твердими паливами, наводиться в **таблиці 1**.

Технологія отримання зазначених газів спочатку була заснована на використанні пароповітряного дуття, причому повітря попередньо збагачувалося киснем до 40 % (об.). Поряд з цим, підвищити температуру згорання газу можна, проводячи газифікацію при підвищеному тиску. Інший спосіб отримання газів з середньою температурою згорання – газифікація твердого палива із застосуванням парового дуття і попередньо нагрітого до 900-1100 °C твердого теплоносія. В якості останнього можна використовувати золу, яка залишається після спалювання частини палива. Подібний варіант дозволяє отримувати газ, що складається в основному з CO і H<sub>2</sub> в співвідношенні, близькому до 1:1, проте цей спосіб випробований поки лише на невеликих дослідно-промислових установках.

Гази з високою температурою згорання, що наближаються за цим показником до природного газу, в даний час у промислових масштабах не виробляють. Проте технологія їх отримання в ряді випадків відпрацьована на досить великих дослідно-промислових установках. Основа підвищення температури згорання газу – збагачення його метаном за рахунок проведення газифікації при підвищеному тиску, завдяки чому інтенсифікується взаємодія вуглецю і його оксидів з воднем, що утворюється в шарі палива. Продуктом цих реакцій є метан.

Розроблено також кілька варіантів багатоступінчастих газогенераторів, в яких передбачені максимальне вилучення летючих продуктів з палива і подальша газифікація вуглецевого залишку із застосуванням водневмісних газів в якості газифікуючого агента (гідрогазифікація). Поряд з цим газ, збагачений метаном, може бути отриманий з низько-і середньокалорійного газу шляхом гідрування оксидів вуглецю, що містяться в ньому.

Гази заданого складу призначені для безпосереднього синтезу хімічних продуктів і являють собою суміші водню з азотом або оксидом вуглецю (в широкому діапазоні співвідношень) або технічний водень.

Інформацію про склад генераторного газу та продукти, що отримуються на їх основі, дає **таблиця 1**.

Основна вимога в даному випадку – необхідність забезпечити задане співвідношення цільових компонентів в одержуваному газі.

Для орієнтовної оцінки складу газу, одержуваного при тих чи інших умовах, часто використовують поняття про «ідеальний» генераторний газ. Під ними розуміють гази, що утворюються при взаємодії чистого вуглецю і газифікуючих агентів (CO<sub>2</sub> і H<sub>2</sub>O) з отриманням тільки горючих компонентів (не рахуючи азоту при використанні повітряного дуття). Характеристикою «ідеальних» генераторних газів служать їх склад [% (об.)], вихід (м<sup>3</sup> на 1 кг палива), теплота згорання (кДж/м<sup>3</sup>) і коефіцієнт корисної дії газифікації (η). Останній знаходять як відношення кількості тепла, яке можна отримати при спалюванні утвореного газу (Q<sub>1</sub>), до кількості тепла, що виділяється при спалюванні витраченого палива (Q<sub>2</sub>). У разі ендотермічного процесу знаменник повинен бути збільшений на величину теплового ефекту реакції (Q<sub>3</sub>):

$$\eta = Q_1 / (Q_2 + Q_3) \quad [1]$$

Існує кілька типів «ідеальних» генераторних газів.

Повітряний газ може бути отриманий при взаємодії вуглецю з киснем повітря за екзотермічною реакцією, що супроводжується виділенням тепла у кількості 52300 ккал.

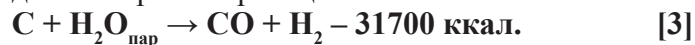


**Склад ідеального повітряного газу:**  
CO – 34,5 %; N<sub>2</sub> – 65,5 %

**Вихід ідеального повітряного газу з 1 кг вуглецю V<sup>1</sup> = 5,41 м<sup>3</sup>**

**Теплотворна здатність Q = 1050 Ккал/м<sup>3</sup>**  
**η = 72,3 %**

*Водяний газ* – продукт взаємодії вуглецю з водяним паром по реакції:



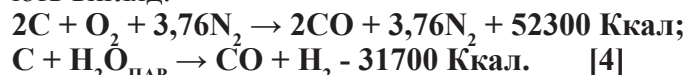
**Склад ідеального повітряного газу:**  
CO – 50,0 %; H<sub>2</sub> – 50,0 %

**Вихід ідеального повітряного газу з 1 кг вуглецю V<sup>1</sup> = 3,73 м<sup>3</sup>**

**Теплотворна здатність Q = 2815 Ккал/м<sup>3</sup>**  
**η ≈ 100,0 %**

Ця реакція ендотермічна (- 31700 Ккал), тому кількість тепла, що витрачається на її проведення, має бути врахована при розрахунку коефіцієнта корисної дії газифікації.

Напівводяний газ отримують на пароповітряному дуття. При цьому одночасно протікають реакції [2] та [3], причому основна умова полягає в тому, що все тепло, що виділяється по реакції [2], має витрачатися за реакції [3]. Для дотримання цієї умови з 2 моль вуглецю, що реагує з реакції [2], повинно взаємодіяти 1,65 моль вуглецю по реакції [3]. Рівняння процесу в цьому випадку мають вигляд:



Для дотримання рівноваги екзотермічних і ендотермічних теплових ефектів цих реакцій на 2 кг-моль вуглецю, що вступає в реакцію з пові-



Таблиця 2

Генераторний газ (ідеальний)	Склад, % об.			Вихід газу з 1 кг вуглецю, м <sup>3</sup>	Теплотворна здатність газу (низ.)		к.к.д., % (по тепловому ефекту)
	СО	Н <sub>2</sub>	п <sub>2</sub>		ккал/ м <sup>3</sup>	кДж/ м <sup>3</sup>	
Повітряний	34,5	-	65,5	5,41	1050	4396	72,3
Водяний	50,0	50,0	-	3,73	2815	11786	100,0
Напівводяний	40,1	18,1	41,8	4,65	1685	7055	100,0
Оксиводяний	68,9	31,1	-	2,71	2900	12142	100,0

трам, повинні вступити реакцію з водяною парою  $52300/31700 = 1,65$  кг-моль вуглецю.

Склад ідеального повітряного газу:

СО – 40,1 %; Н<sub>2</sub> – 18,1 %; N<sub>2</sub> – 41,8 %

Вихід ідеального повітряного газу з 1 кг вуглецю  $V^1 = 4,65$  м<sup>3</sup>

Теплотворна здатність:  $Q = 1685$  Ккал/ м<sup>3</sup>  
 $\eta \approx 100,0$  %

Оксиводяний газ можна отримати на парокисневому дутті при тих же умовах, що і напівводяний. Процес отримання оксиводяного газу відрізняється тільки тим, що замість повітря подається чистий кисень, тобто в газі відсутній баласт (азот).  
 $3,65C + 1,65 H_2 \rightarrow 3,65CO + 1,65H_2 + 20600$  Ккал. [5]

Склад ідеального повітряного газу: СО – 68,9 %; Н<sub>2</sub> – 31,1 %

Вихід ідеального повітряного газу з 1 кг вуглецю  $V^1 = 2,71$  м<sup>3</sup>

Теплотворна здатність  $Q = 2900$  Ккал/м<sup>3</sup>  $\eta \approx 100,0$  %

Основні характеристики і вихід ідеального генераторного газу з 1 кг вуглецю наведені в таблиці 2.

Видно, що найбільша кількість газу утворюється при отриманні повітряного газу, проте його теплота згоряння невелика внаслідок того, що майже 2/3 його об'єму припадає на азот. В цьому випадку спостерігається також найменший к.к.д. газифікації. При отриманні генераторних газів з використанням водяної пари к.к.д. дорівнює 100 %, а теплота згоряння одержуваного газу істотно вище, ніж у повітряного. Слід зазначити, що вихід газу і його теплота згоряння знаходяться в зворотній залежності: при збільшенні одного з цих параметрів відбувається зменшення іншого.

Дані, пов'язані з «ідеальним» генераторним газом, як і результати термодинамічних розрахунків рівноважних складів, можна використовувати для оцінки результатів газифікації при різних умовах.

**Поршневі і турбінні теплові електростанції (когенератори). Порівняння і вибір.** До сьогоднішнього дня можливими приводами електрогенераторів для автономних теплових електростанцій є газові поршневі і турбінні двигуни внутрішнього згоряння (ДВЗ) і двигуни з зовнішнім підведенням тепла (ДЗПТ), так звані двигуни системи «Стірлінг».

Найважливішим фактором, що визначає вибір типу двигуна, є питома вартість обладнання.

Як видно з рис. 4, при одиничних потужностях менше 3,5 МВт, найменша питома вартість об-

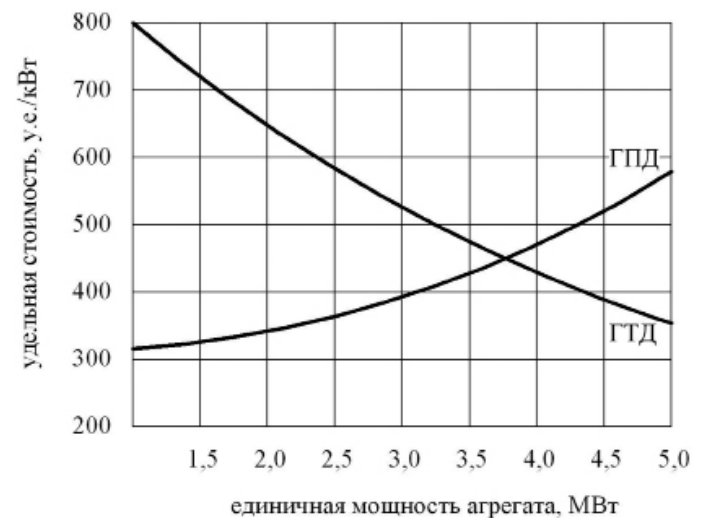


Рис. 4. Питома вартість поршневої і турбінної установок

ладнання у поршневих машин. Тут потрібно зауважити, що вартість обладнання і вартість станції не одне і те ж, особливо в тому випадку, коли мова йде про підвід газу високого тиску (що потрібно для газових турбін).

Наступними, дуже важливим фактором є витрата, яка безпосередньо пов'язана з терміном окупності обладнання станції.

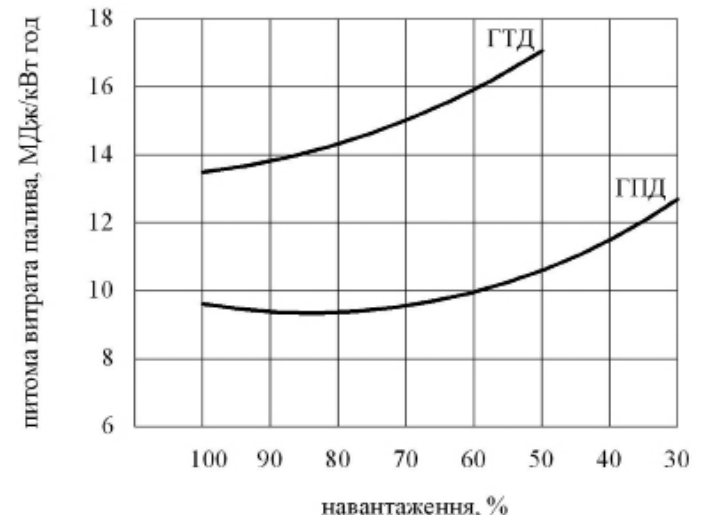


Рис. 5. Питома витрата палива поршневої і турбінної установок

Питома витрата палива на вироблений кВт × год. (див. рис. 5) менше у газопоршневій установ-



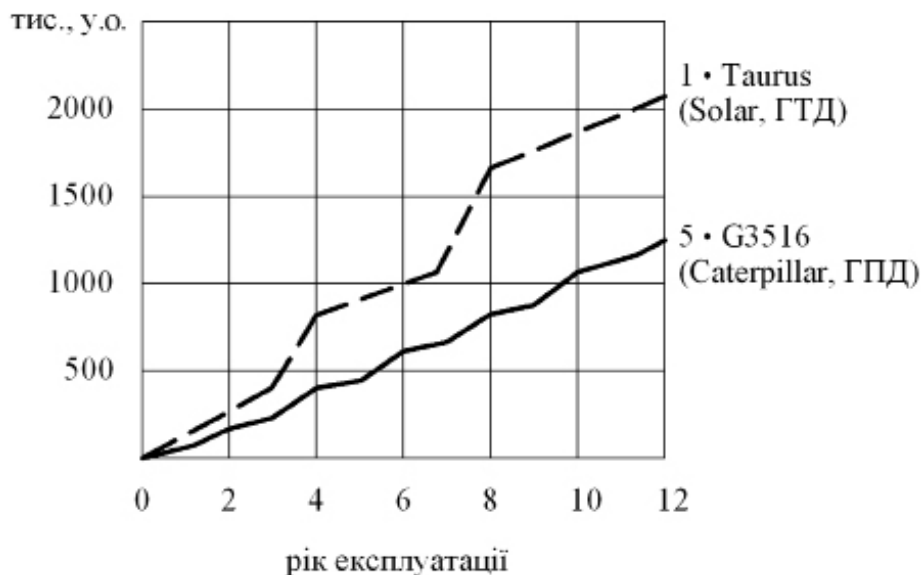


Рис. 6. Експлуатаційні витрати на електростанцію потужністю 5 МВт

Таблиця 3

Показник	Газопоршневий привід (ГПД)	Газотурбінний привід (ГТД)
Довговічність	без обмеження при дотриманні правил експлуатації і обслуговування	без обмеження при дотриманні правил експлуатації і обслуговування
Ремонтопридатність	* ремонт відбувається на місці; * ремонт потребує менше часу	* ремонт відбувається на спеціальних заводах; * затрати часу і грошей на транспортування, центровку і т.п.
Зберігаємість	* не втрачає властивостей при правильному зберіганні; * може перевозити любым видом транспорту	* не втрачає властивостей при правильному зберіганні; * транспортування залізничним транспортом не бажана
Економічність	ккд мало змінюється при навантаженні від 100 % до 50 % потужності	ккд різко знижується на часткових навантаженнях
Питома витрата палива при 100 % і 50 % навантаженнях	9,3-11,6 МДж/кВт·ч	13,2-17,7 МДж/кВт·ч
Падіння напруження і час відновлення після 50 % додаткового навантаження	22 %; 8 с	40 %; 38 с
Вплив змінного навантаження	* не бажана довга робота при навантаженнях менше 50 %; (сильно впливає на інтервали обслуговування); * при меншій одиничній потужності агрегату, більш гнучка робота електростанції в цілому і вища надійність енергозбереження	* робота на часткових навантаженнях (менше 50 %) не впливає на стан турбіни; * при високій одиничній потужності агрегату, відключення викликає потребу 30...50 % потужності електростанції
Розташування в приміщенні	* потребує більше місця, має більшу вагу на одиницю потужності; * не потребує компресора для дожиму газу, робочий тиск газу на вході – 0,1-0,35 бар	* при потужності електростанції 5 МВт вигреш від меншого розміру приміщення не значний; * мінімальний робочий тиск газу на вході – 12 бар, потребує газ високого тиску, або компресор та обладнання для запуску турбіни
Обслуговування	* зупинка після кожних 1000 год. роботи, заміна масла; * кап. ремонт через 72 000 год. роботи, виконується на місці монтажу	* зупинка після кожних 2000 год; * кап. ремонт через 60 000 год, виконується на спеціальному заводі

ки, причому, при будь-якому навантажувальному режимі. Це пояснюється тим, що ККД поршневих машин становить 36-45 %, а газотурбінних – 25-34 %.

Експлуатаційні витрати на теплову електростанцію з поршневими машинами нижче, ніж на електростанцію з газовими турбінами (див. рис. 6). Різкі скачки на графіку ГТД – капітальні ремонти двигуна. У експлуатаційних витрат ГПД таких стрибків немає, капітальний ремонт потребує значно менше фінансових і людських ресурсів.

Порівняння газопоршневих і газотурбінних двигунів за іншими важливими ознаками експлуатації наведено в таблиці 3.

Порівняння турбінних і поршневих двигунів для застосування на автономних ТЕЦ показує, що встановлення газових турбін найбільш вигідне на великих промислових підприємствах, які мають значні (більше 8-10 МВт) електричні навантаження, власну виробничу базу, висококваліфікований персонал для експлуатації установки, введення газу високого тиску.

Автономні теплоелектростанції на базі газопоршневих двигунів перспективні в якості основного джерела електроенергії і теплоти на підприємствах самого широкого діапазону діяльності, а особливо, на цукрових заводах в поєднанні з газогенераторами, що дозволяють перетворювати суміші біомас з вугіллям в моторне паливо – генераторний газ.

### Висновок

Представлені матеріали аргументують необхідність утилізації органічних відходів цукрових заводів і переконують, що термоутилізація – процес технічно можливий, економічно доцільний і має високу енергоефективність. Її застосу-

вання принесе прибуток, що позитивно вплине на техніко-економічні показники роботи заводу, сприятиме створенню нових робочих місць і поліпшить екологічну обстановку в регіоні.

При утилізації органічної біомаси шляхом газифікації з'являється можливість додатково отримати і використовувати теплову і електричну енергію.

Запропоновані у статті схемні рішення утилізації органічних відходів цукрових заводів, забезпечують повну утилізацію в автоенергетичному режимі, але вимагають детального опрацювання на стадіях проектування та всебічного вивчення в процесі експлуатації в умовах адаптації під діюче підприємство.

### Список використаних джерел:

1. Гринь Л.П. Силовые газогенераторные установки, Машгиз, 1956, с.45-59.
2. Кафтанов С.В. Общая химическая технология топлива, М-Л, 1947, с.186-200.
3. Канторов М. В. Газогенераторы и газогенераторные станции в металлургической промышленности, Металлургиздат, Свердловское отделение, 1958, с.202-231.
4. Коллеров Л.К. Газификация твердых топлив, Машгиз, 1952, с.19-25.
5. Патент України № 75529.
6. Осьмак О.О., Серьогін О.О. Системний підхід до вирішення проблеми газифікації рослинної біомаси / Харчова промисловість, Київ НУХТ - № 10-11, 2011. – С. 302-308.
7. Осьмак О.О., Серьогін О.О. Газогенерація – безвідходна і авто енергетична технологія утилізації промислових відходів Збірник наукових праць / Вінницького національного аграрного університету, Вінниця – випуск 8, 2011. – С. 87-91.

## ЦІКАВІ ФАКТИ

### Добування цукристих речовин з лісових деревних порід

*Цукристі речовини можна добувати з диких рослин: ялівцю, берези та клену. У ялівцю цукристі речовини містяться тільки в плодах (ягодах).*

Сам принцип добування цукристих речовин з ягід ялівцю дуже простий: зібрані зрілі ягоди розминають в дерев'яній ступі в мезгу, останню вилуговують гарячою водою, відстоюють, фільтрують через марлю, а потім фільтрат упарюють до густини сиропу. Отриманий солодкий ялівцевий сироп придатний для вживання як замітник цукру. Але здобутий таким чином ялівцевий сироп має смолянистий запах і присмак, що знижує його якості як цукрозамінника.

Придатнішими рослинами для отримання цукристих речовин є гостролистий клен і береза.

Із стовбура клена та берези при їх пораненні виділяється солодкий сік. Сік цей містить близько 3% цукристих речовин у клена та близько 1,5-2% у берези. Найбільш придатними для підсочування є дерева здорові, з товщиною стовбура на висоті грудей від 20 см і вище, що ростуть на височинах, незатінені, з багатою кроною.

Кленовий сироп має дуже приємний запах і смак. Цукристість його досягає 65-70%. Березовий же сироп не має аромату та часто при невдалому випарюванні може мати дещо неприємний присмак. Березовий сироп може бути позбавлений неприємного присмаку шляхом «присмачення» його невеликими кількостями свіжих або сухих ароматних ягід.