



Програма управління знаннями для розвитку сталої біоенергетики

Технологічні аспекти спалювання біомаси в енергетичних установках

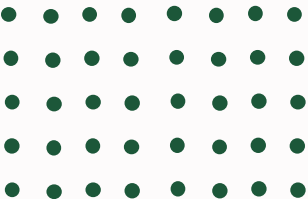
Володимир Крамар, к.т.н.,
ТОВ «НТЦ «Біомаса»,
Біоенергетична асоціація
України





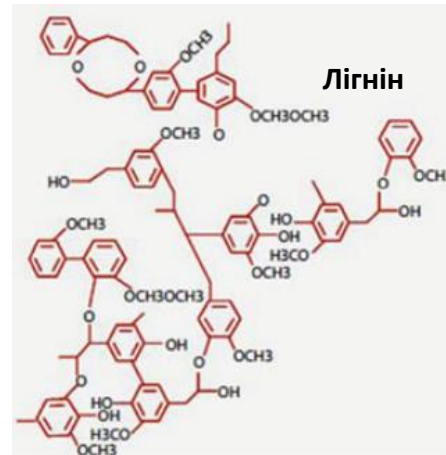
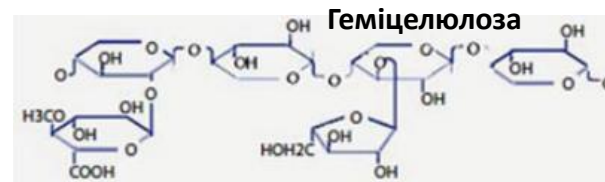
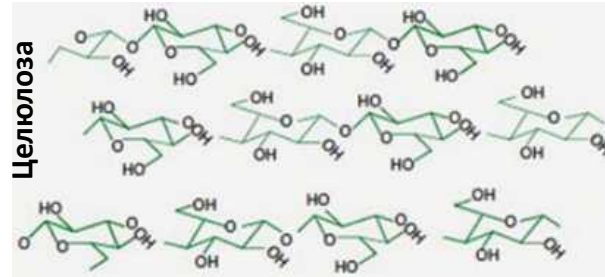
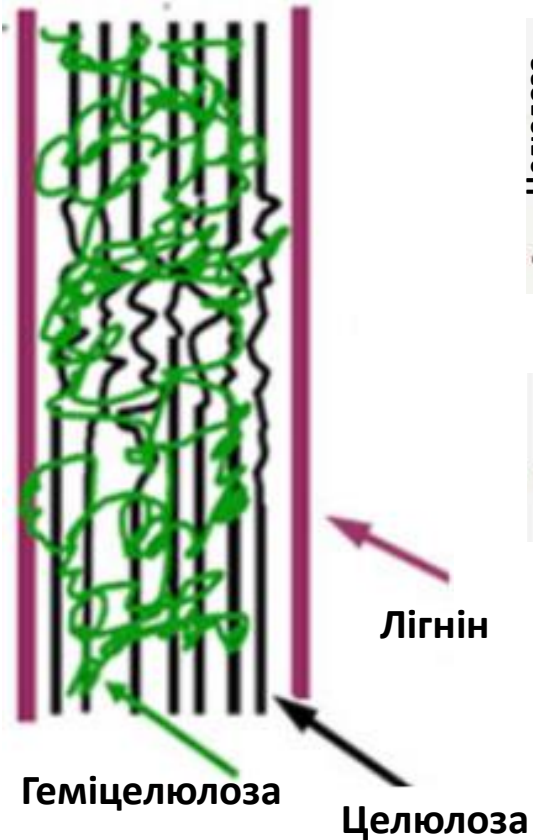
Зміст

- 01** Фізико-хімічні основи спалювання біомаси
- 02** Двостадійне спалювання біомаси
- 03** Класифікація технологій спалювання біомаси
- 04** Особливості спалювання соломи
- 05** Основні переваги та недоліки технологій спалювання
- 06** Технологічні проблеми при спалюванні біомаси
- 07** Енергетична ефективність та регулювання котлів на біомасі



Фізико-хімічні основи спалювання біомаси

Основними компонентами клітин деревини є целюлоза, геміцелюлоза і лігнін, які складають близько 99% ваги деревного матеріалу.



□ Целюлоза ($C_6H_{10}O_5)_n$ – основа будівельного матеріалу рослин; це полімер, що складається з повторюваних глюкозних залишків ($C_6H_{12}O_6$), сполучених між собою β - зв'язками. Волокнисті стінки складаються в основному з целюлози і становлять від 40 до 45% сухої ваги деревини.

□ Геміцелюлоза складається з різних цукрів, крім глюкози, які утворюють целюлозні волокна та становлять від 20 до 35% сухої маси деревини.

□ Лігнін ($C_{40}H_{44}O_6$) – нецукровий полімер, який надає міцності деревному волокну, і становить від 15 до 30% сухої ваги.

Фізико-хімічні основи спалювання біомаси

Горючі речовини твердого палива можна розділити на дві групи: **леткі речовини** та горючі компоненти у вигляді **твердого вуглецю**.

Частка летких речовин у біомасі зазвичай висока, тоді як частка твердого вуглецю низька.

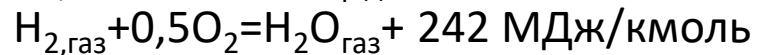
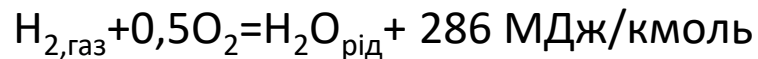
Леткі речовини - це газоподібна фаза, що утворюється в результаті термічної деградації матеріалу. Його можна розділити на дві частини: легкі леткі речовини та смоли (що складаються з більших молекул, які конденсуються при температурі навколишнього середовища).

Вища теплота згоряння:

$$Q_B^p = 0,3491 \cdot C + 1,1783 \cdot H + 0,1005 \cdot S - 0,0151 \cdot N - 0,1034 \cdot O - 0,0211 \cdot A \left[\frac{\text{МДж}}{\text{кг}} \text{dry} \right], \text{ де:}$$

C, H, S, N, O – вміст елементів, A- вміст золи, % на суху масу.

Реакції горіння водню:



Перерахунок на нижчу теплота згоряння:

$$Q_H^p = Q_B^p \cdot \left(1 - \frac{W}{100} - \frac{A}{100} \right) - 2442 \cdot \left\{ \frac{W}{100} + \frac{H \cdot 9}{100} \cdot \left(1 - \frac{W}{100} - \frac{A}{100} \right) \right\} \left[\frac{\text{МДж}}{\text{кг}} \right], \text{ де:}$$

Q_H^p – нижча теплота згоряння, на робочу масу ; Q_B^p - вища теплота згоряння, на суху беззолну масу;

W- вміст води, % роб.мас; A- вміст золи, % роб.мас; H – вміст водню, % на суху беззолну масу.

Для спрощених розрахунків:

$$Q_H^p = 18581,3 - 210,2 \cdot W - 185,8 \cdot A \left[\frac{\text{кДж}}{\text{кг}} \right], \text{ де } W, A - \% \text{ вміст води та зольність на робочу масу палива}$$

Хімічний склад основних видів біомаси

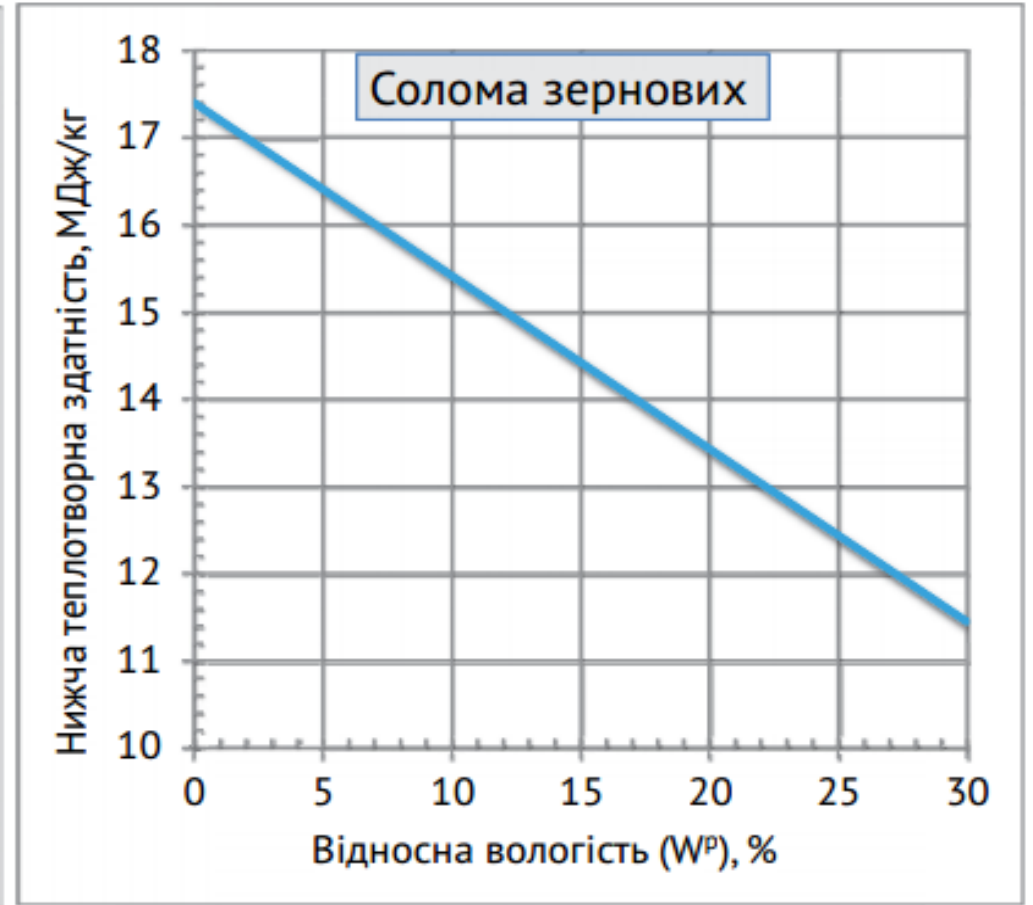
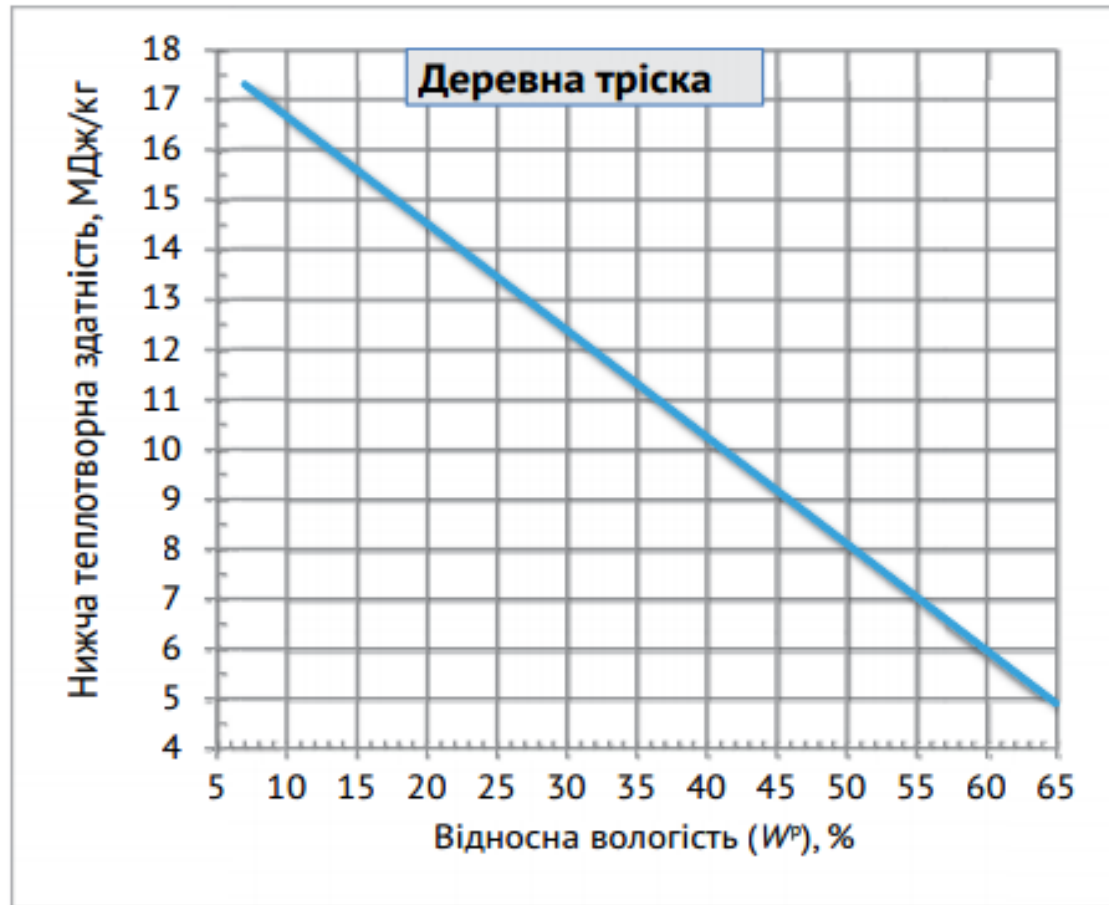
Вид палива	Мул	Деревина	Трава	Солома	Лушпиння	Кора	Торф	Вугілля
Волога (W), мас%	64,3	15,9	30,7	10,4	9,0	13,0	41,2	8,1
Зола (A), мас% dry	19,4	0,6	3,6	8,6	10,8	3,7	5,5	11,8
Леткі, мас% daf	87,8	84,1	83,5	81,1	79,8	76,5	73,9	38,4
Q_b^p , МДж/кг daf	18,8	20,3	19,7	19,5	20,5	21,3	22,9	33,8
Q_{ch}^p , МДж/кг daf	17,9	19,0	18,5	18,1	19,1	19,7	21,4	31,1
C, мас% daf	51,2	51,2	49,6	48,8	50,4	53,8	57,4	79,4
H, мас% daf	6,24	6,15	5,72	5,99	6,28	5,84	6	5,29
O, мас% daf	41,4	42,4	43,9	43,9	42,6	40	35,5	12,2
N, мас% daf	<1,5	<0,5	<1,5	<1,5	<1,5	<0,5	1,9	1,5
S, мас% daf	<1,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	0,3	1,4
Cl, мас% daf	0,43	0,027	0,196	0,496	0,143	0,022	0,059	0,25
Si, мг/кг dry	46000	Н/Д	6775	17025	14000	422	12615	25148
Al, мг/кг dry	27700	Н/Д	100	1579	2700	188	4181	13123
Fe, мг/кг dry	1747	Н/Д	109	1417	2300	90	6387	7255
Ca, мг/кг dry	88600	Н/Д	1273	4694	13000	13622	6200	5421
Mg, мг/кг dry	2870	Н/Д	534	1818	5100	728	634	1666
Na, мг/кг dry	1725	30	319	610	1090	40	144	1142
K, мг/кг dry	1652	680	7633	11634	22233	1627	548	1287

dry – на суху масу; daf – на суху беззольну масу

Вища теплота згорання палива Q_b^p – теплота, що виділяється при повному окисленні горючих складових палива, плюс теплота, що виділяється при конденсації водяної пари, що міститься в продуктах згорання палива.

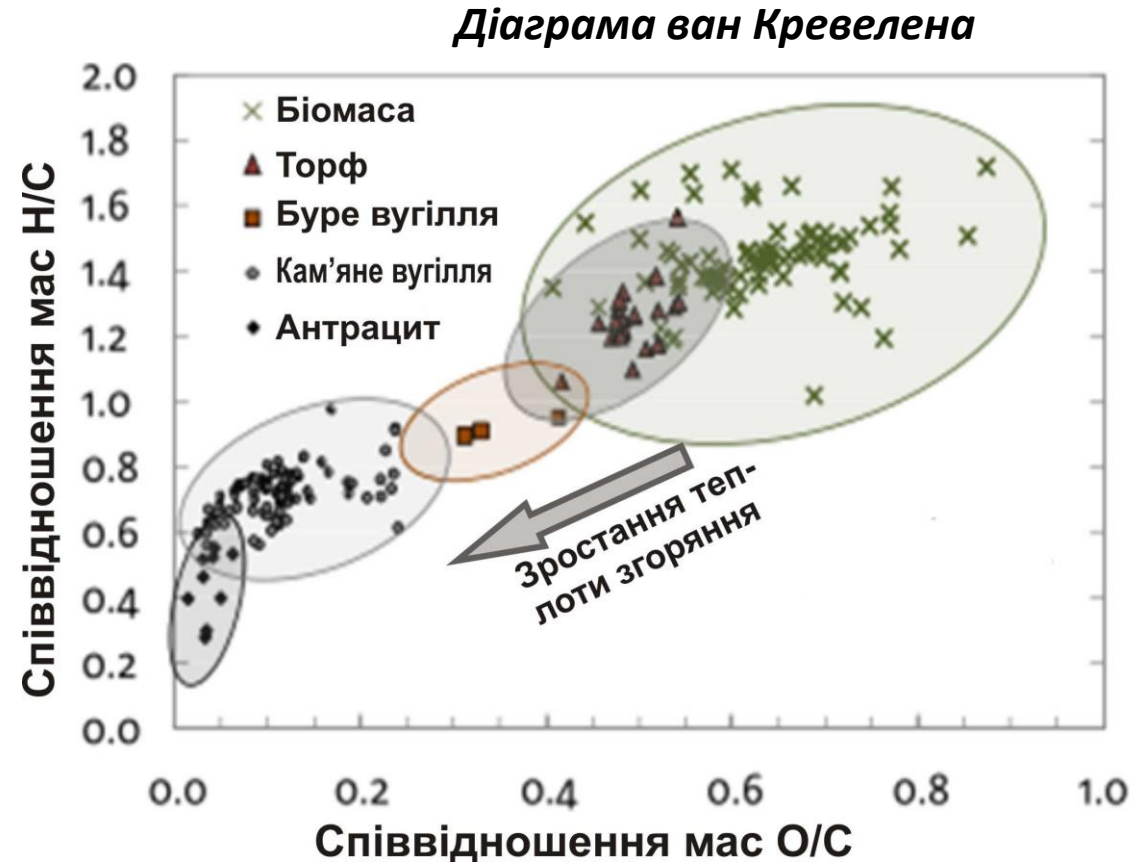
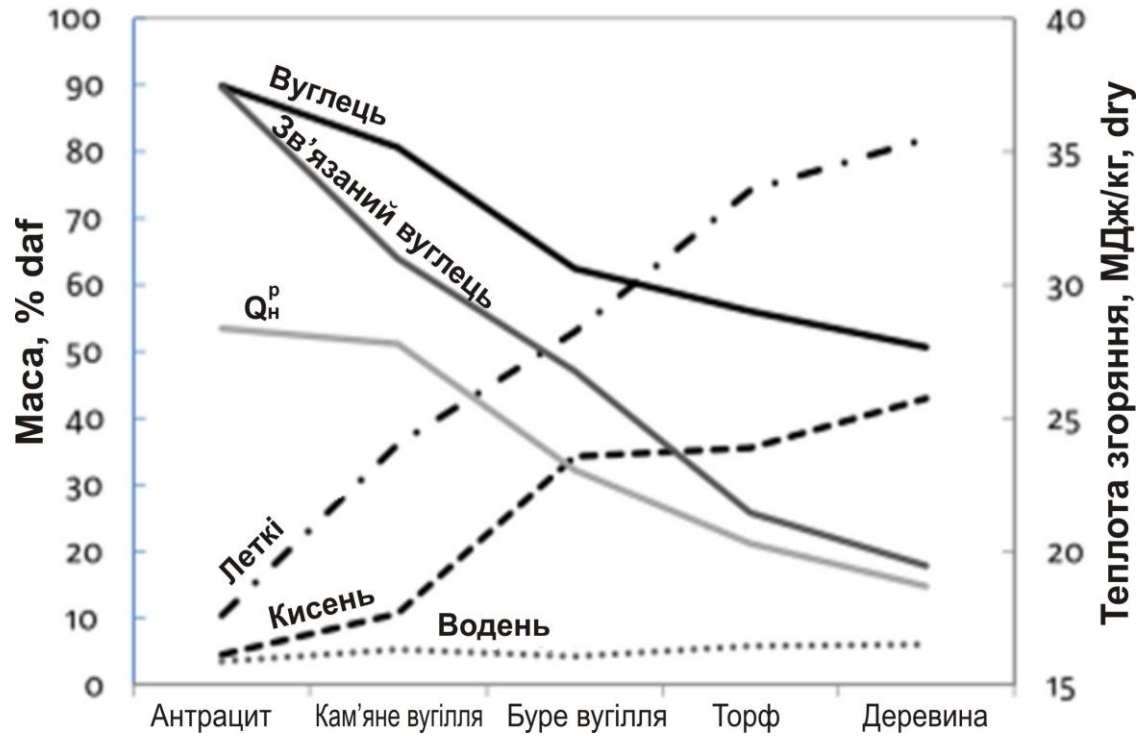
Нижча теплота згорання палива Q_{ch}^p – теплота, що виділяється при повному окисленні всіх горючих складових палива.

Вплив вологості на теплоту згоряння біомаси



- ❖ Відносна вологість палива – відношення маси води до всієї маси палива
- ❖ Абсолютна вологість палива – відношення маси води до маси сухого палива

Вплив хімічного складу на теплоту згоряння біомаси



Основні положення динаміки хімічних реакцій

Хімічні реакції відбуваються при зіткненні молекул реагентів, тобто при достатньому їх зближенні, коли починають виявлятися сили міжмолекулярної взаємодії. При цьому кінетична енергія молекул, що стикаються, переходить в потенційну енергію і може бути витрачена на руйнування початкових зв'язків у молекулах. Однак ці зв'язки можуть бути зруйновані тільки тоді, коли кінетична енергія молекул, що стикаються, перевищує деяку межу, що називають енергією активації. Крім того, необхідно, щоб при зіткненні молекули були належним чином зорієнтовані між собою. Цей фактор має імовірнісний характер.

Швидкість хімічної реакції можна визначити як швидкість зміни концентрації речовини (**закон Арреніуса**):

$$W = -\frac{dC}{d\tau} = k_0 C_a C_b e^{-E/(RT)}$$

де C_a та C_b – концентрації взаємодіючих речовин, k_0 – стала швидкості реакції, що пропорційна числу зіткнень та імовірнісному фактору, E – енергія активації, R – стала Больцмана, T – температура, K .

Під коефіцієнтом швидкості хімічної реакції розуміють величину:

$$k = k_0 e^{-E/(RT)}$$

Величини E та k_0 визначаються дослідним шляхом, обробкою експериментальних даних.

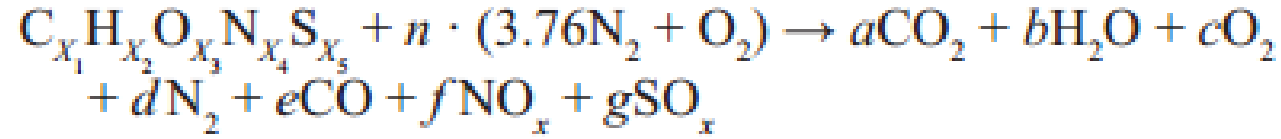
Реакції горіння найчастіше йдуть через проміжні стадії (найпростіші реакції), в яких беруть участь окремі атоми і радикали, що мають низькі енергії активації (**активні центри**).

Тривалість прихованого перебігу процесу від змішування компонентів до появи зовнішніх ознак реакції називають **часом індукції**.

За процесом, що лімітує протікання реакції, розрізняють **кінетичне горіння** (швидкість визначається кінетикою протікання реакцій) або **дифузійне горіння** (швидкість визначається дифузійним процесом підведення кисню до палива).

Фізико-хімічні основи процесів горіння біомаси

Горіння є екзотермічною реакцією між паливом і киснем з утворенням переважно вуглекислого газу та водяної пари:



Для забезпечення горіння палива необхідні:

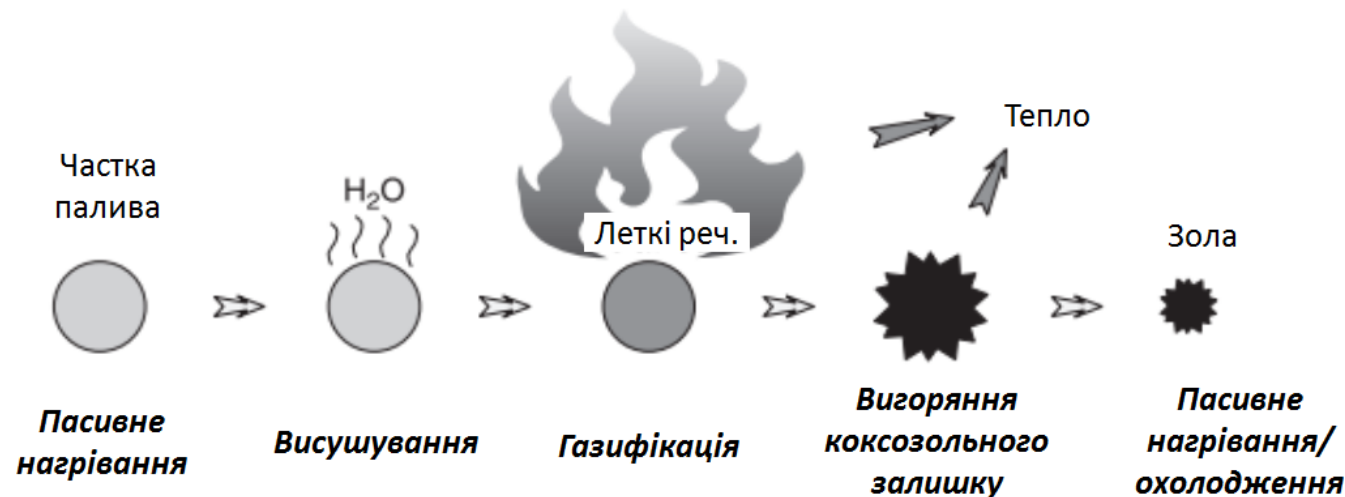
- ❖ підтримка в зоні горіння високої температури;
- ❖ забезпечення безперервної подачі в зону горіння палива і повітря;
- ❖ забезпечення хорошого їх перемішування;
- ❖ організація безперервного відведення продуктів згорання із зони горіння.

Газова фаза- Правило «трьох Т»:

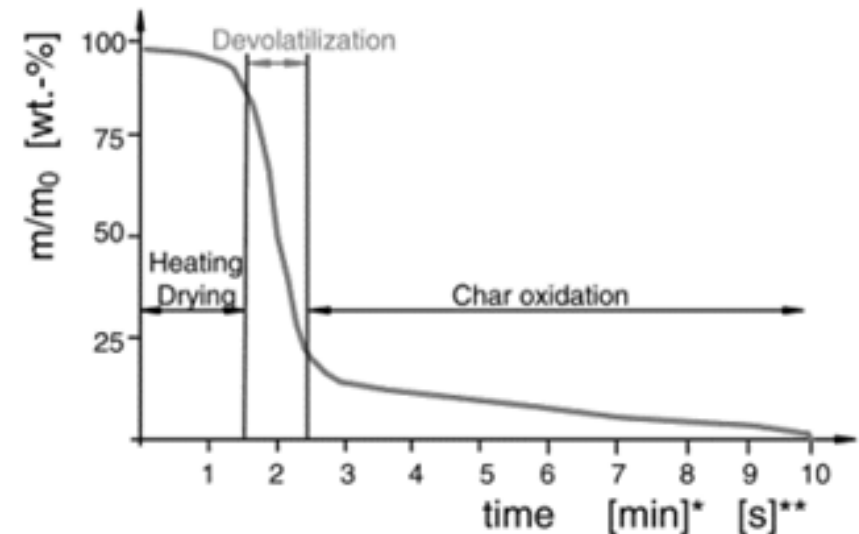
- ✓ Temperature
- ✓ Turbulence
- ✓ Time

Стадії горіння частки твердого палива.

Велика частка палива може проходити кілька стадій одночасно



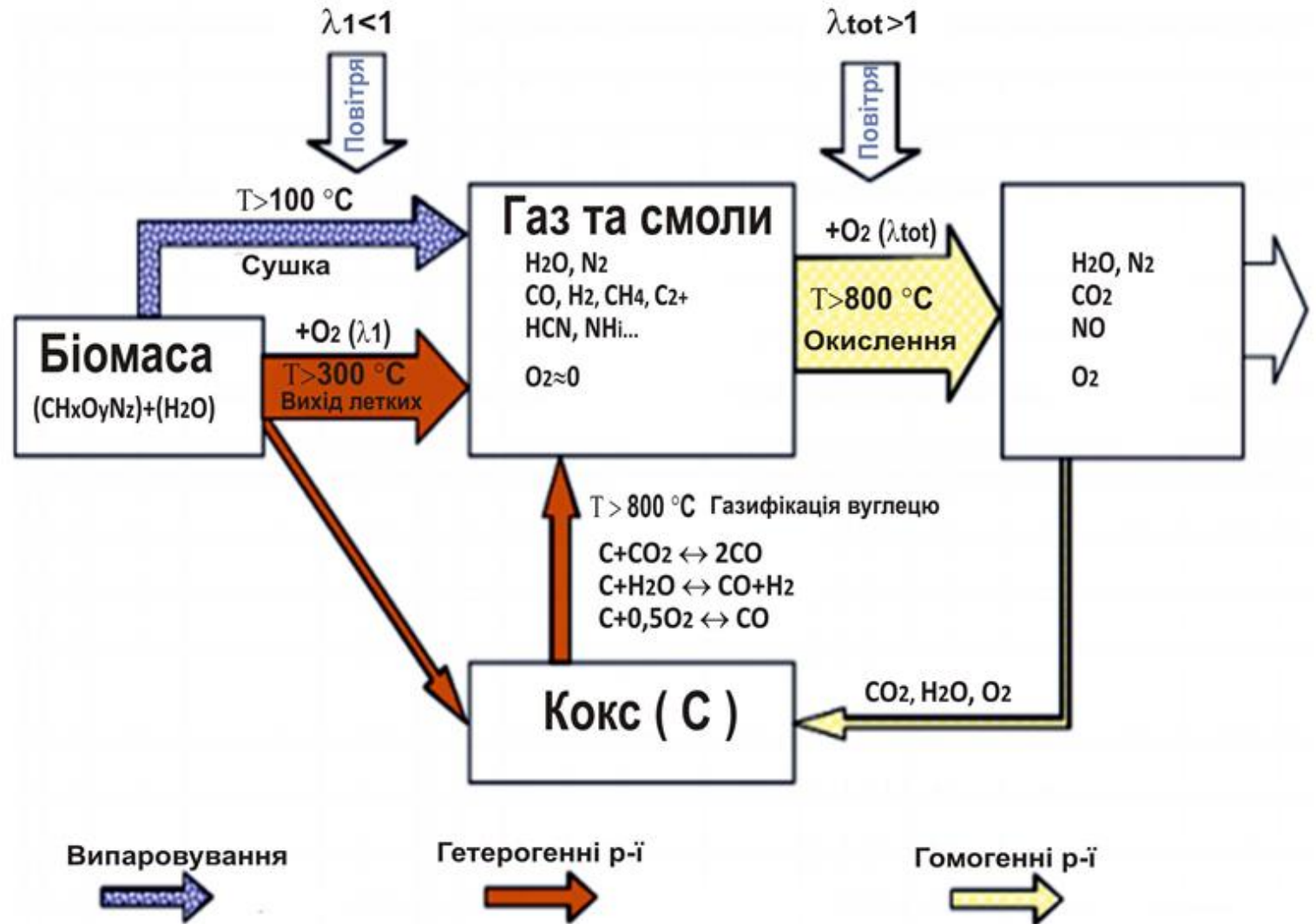
Відносна тривалість стадій. Втрата маси в залежності від часу



Двостадійне спалювання біомаси

- Під теоретично необхідною кількістю повітря розуміють кількість повітря, що необхідно для повного окислення 1 кг твердого, 1 кг рідкого або 1 м³ газоподібного палива.
- При цьому вважають, що кисень повністю витрачається на окислення горючих компонентів.
- Витрату кисню і кількість продуктів згоряння розраховують із стехіометричних рівнянь реакцій горіння для кожного горючого елемента, тобто вуглецю, сірки і водню.
- Відношення дійсно поданої кількості повітря до теоретично необхідної кількості повітря називають **коефіцієнтом надлишку повітря** (α або λ)

Основні реакції при двохстадійному спалюванні біомаси з розподілом на первинне та вторинне повітря



Двостадійне спалювання біомаси – вихід летких

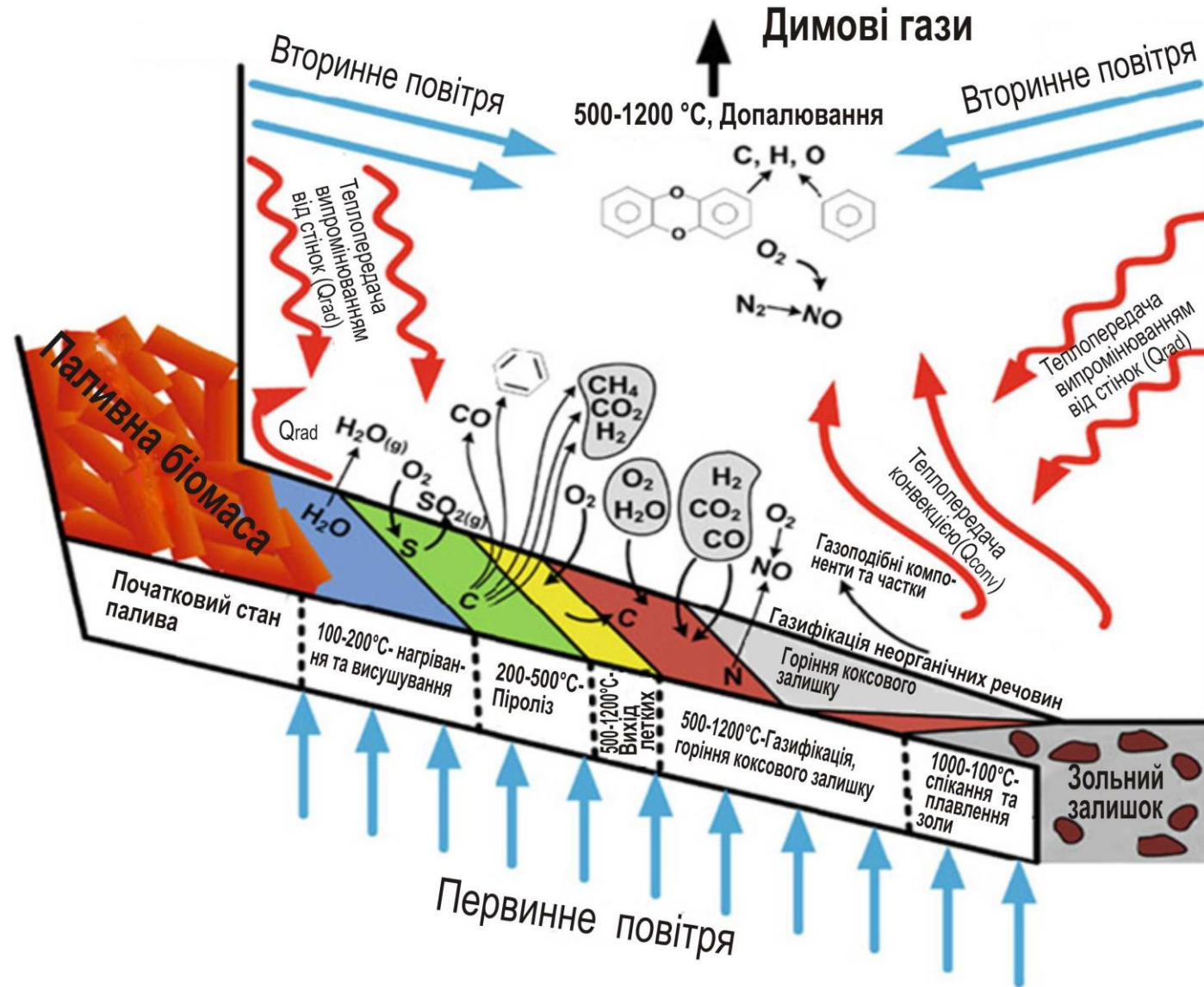


- ❑ Вихід летких речовин та їх змішування з вторинним повітрям

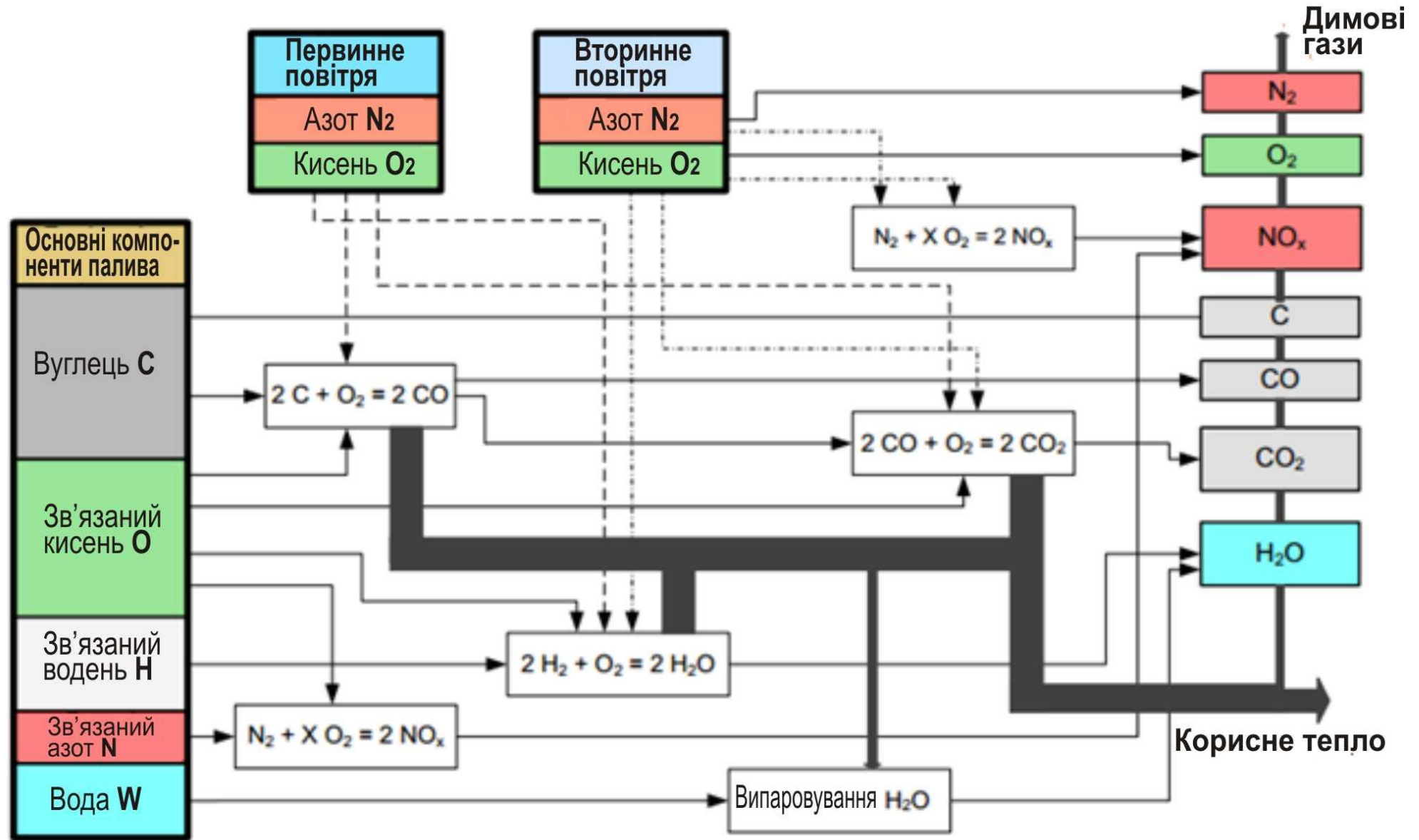


- ❑ Допалювання летких речовин

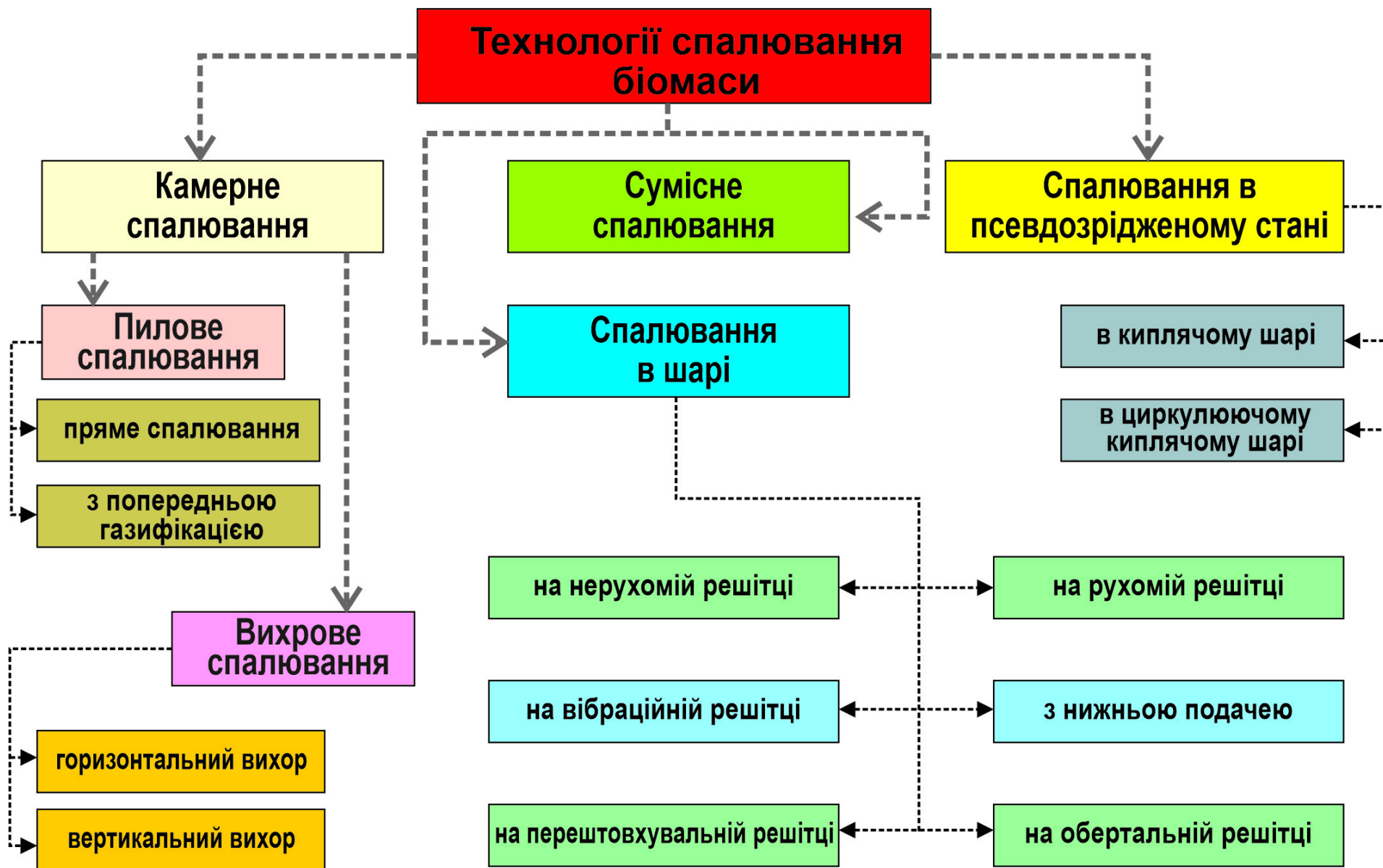
Схема горіння шару біомаси



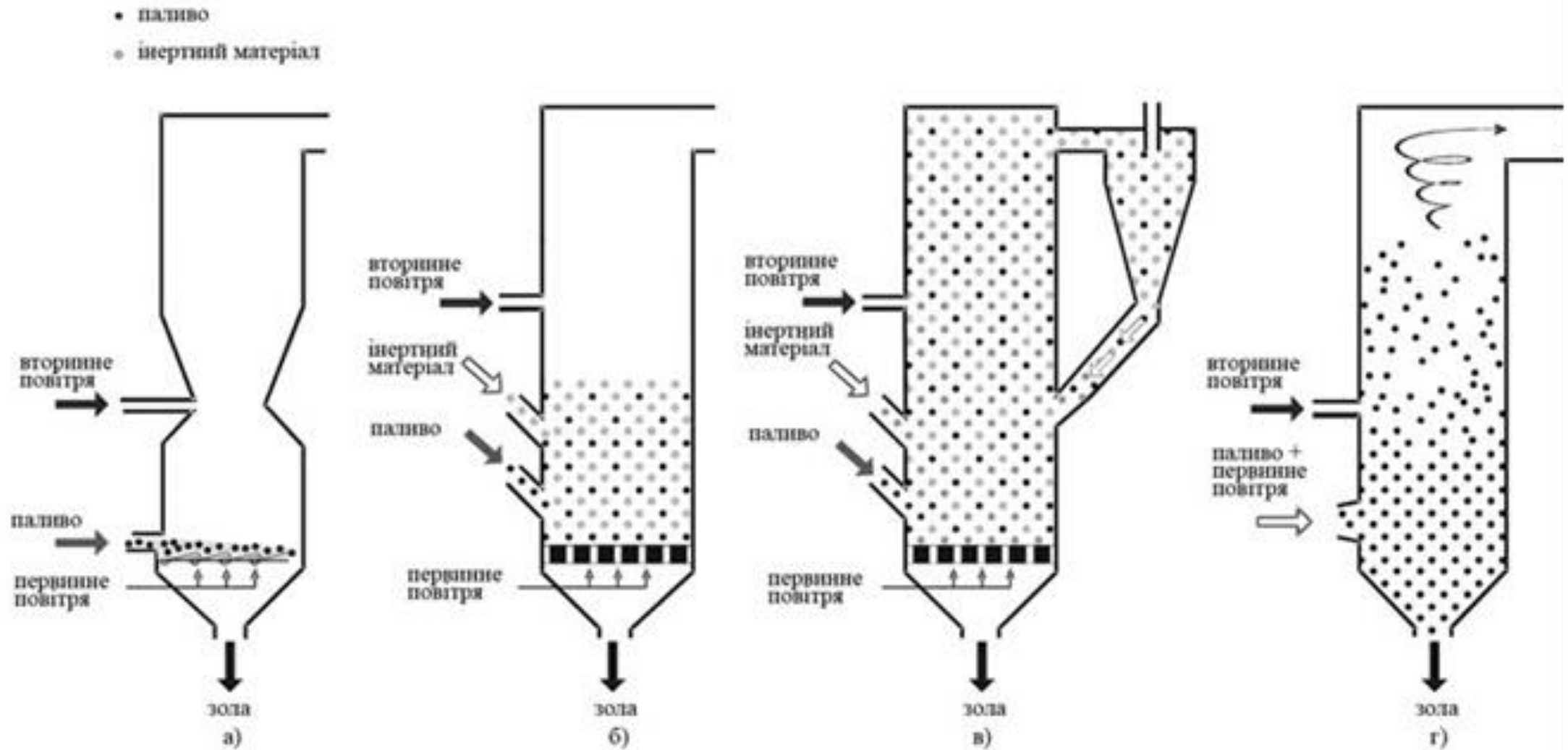
Формування викидів при спалюванні біомаси



Класифікація технологій спалювання біомаси

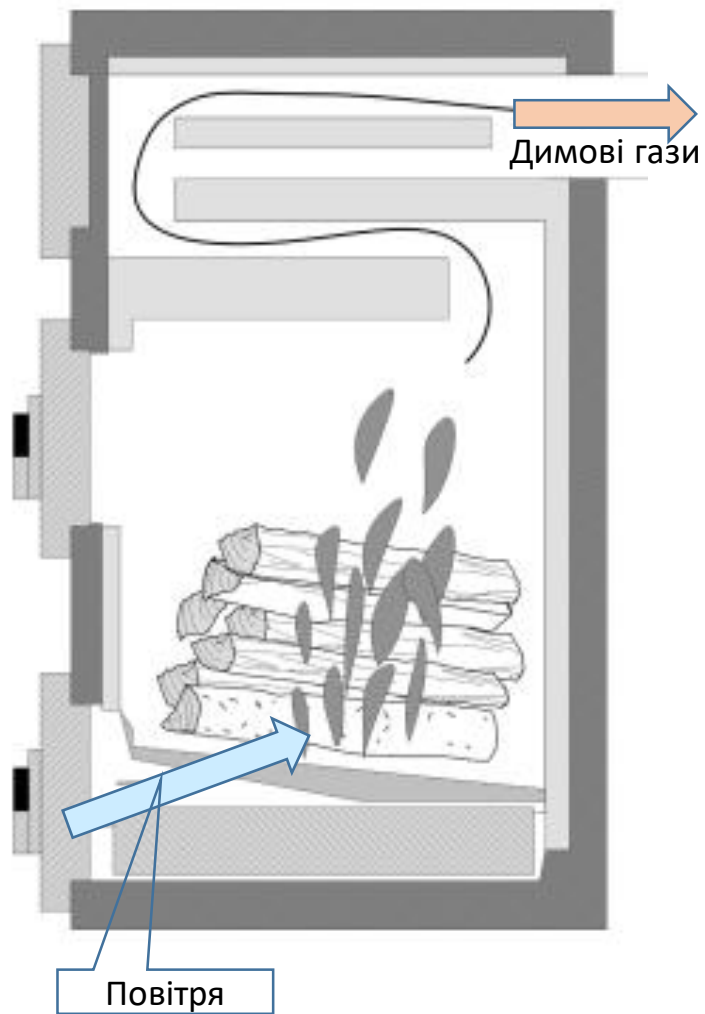


Принципові схеми технологій спалювання біомаси (гранули, кускове паливо, частинки до 20 мм)

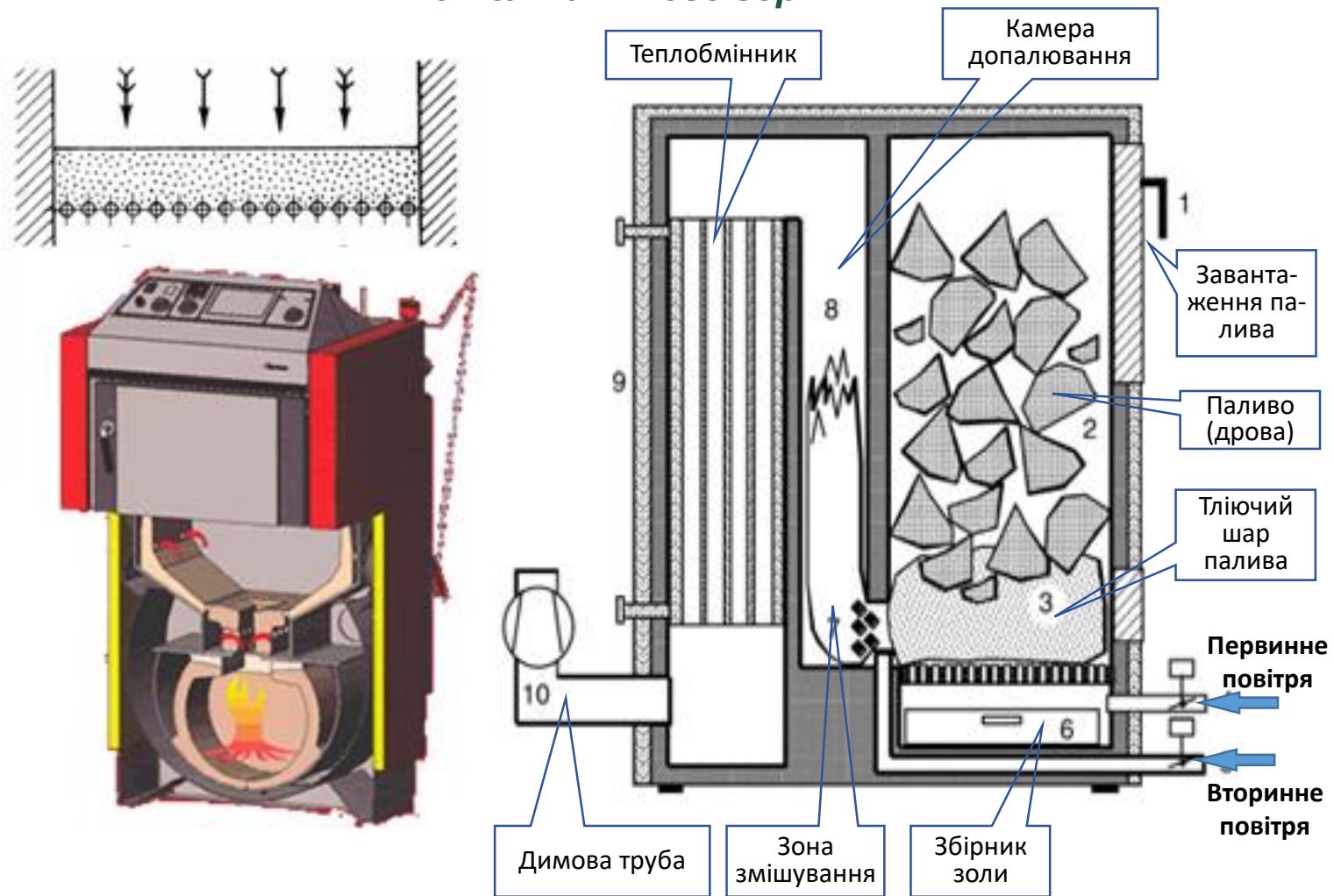


Класифікація технологій спалювання біомаси: нерухомий шар палива

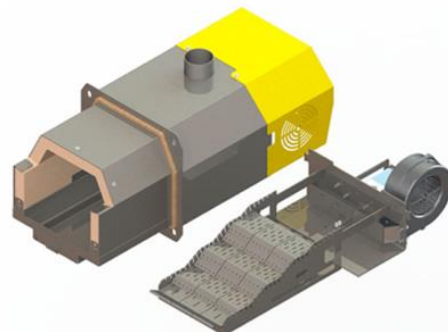
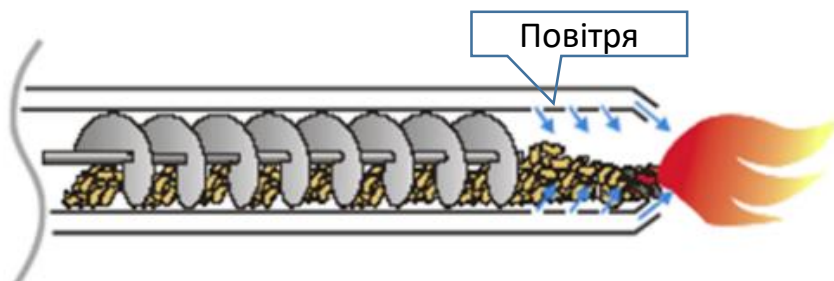
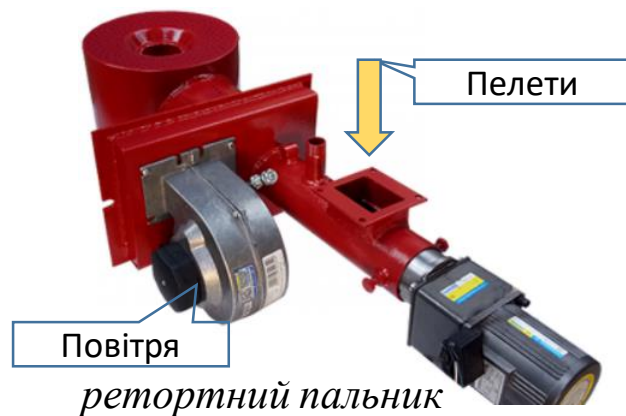
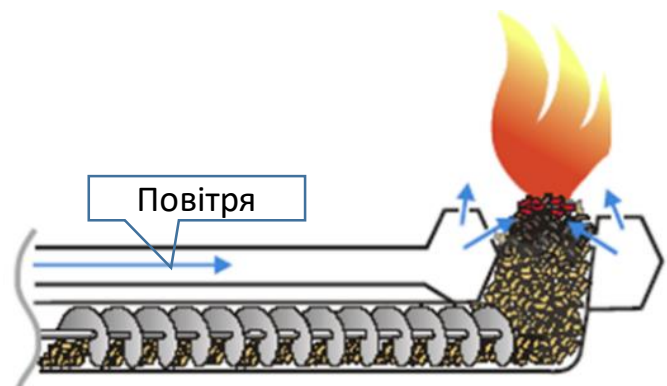
Котел верхнього горіння



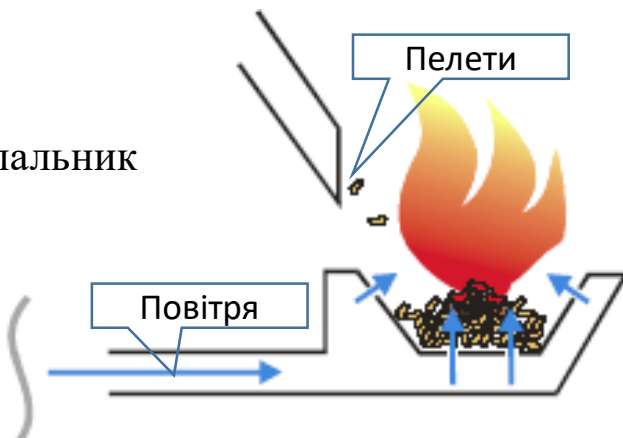
Котел нижнього горіння



Спалювання деревних гранул (пелет)

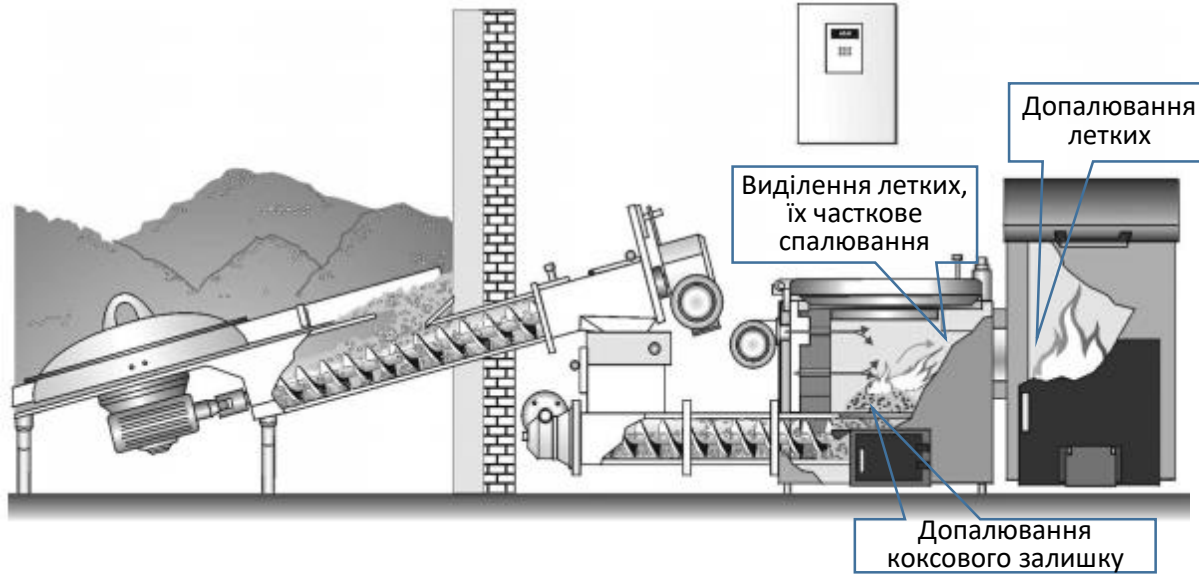


«камінний» пелетний пальник
(верхня подача пелет)

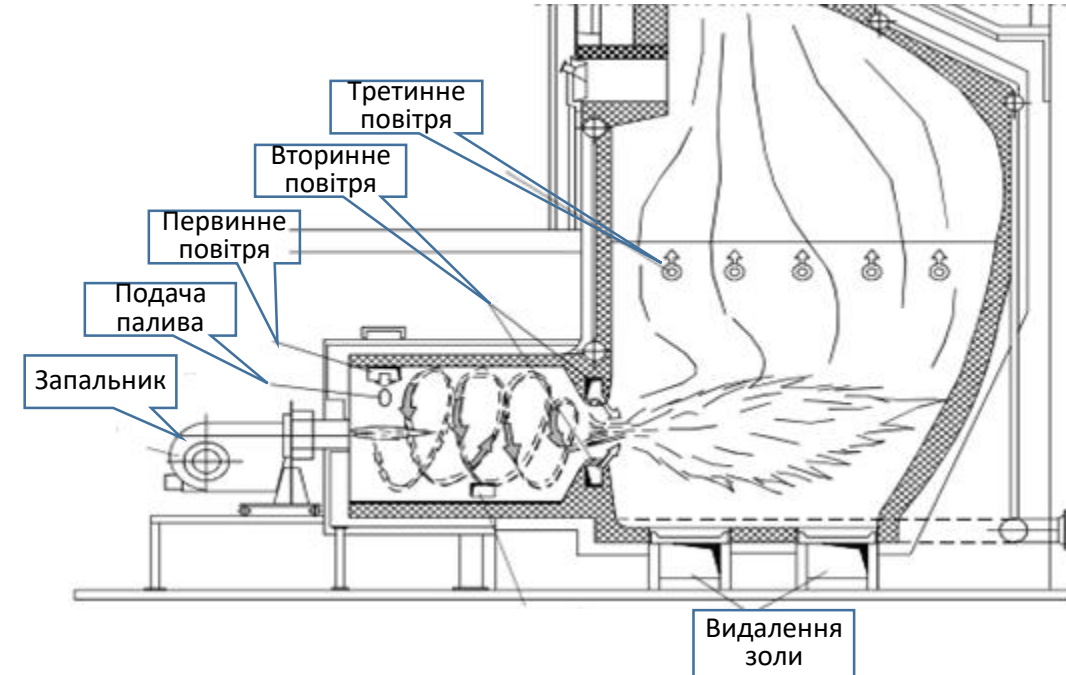


Предтопки для спалювання біомаси

Котел з предтопком (ретортне спалювання)



Котел з предтопком (пилове спалювання)

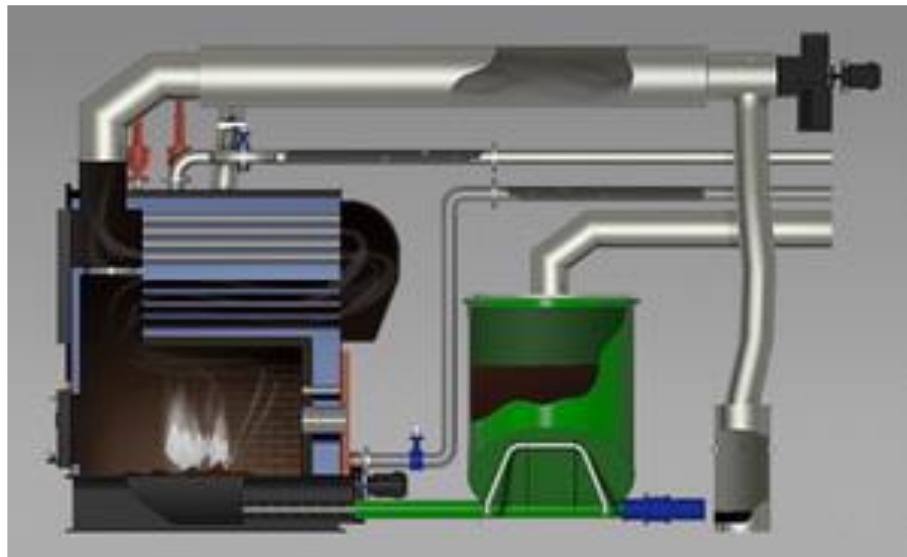


Предтопок компанії «Ретра»

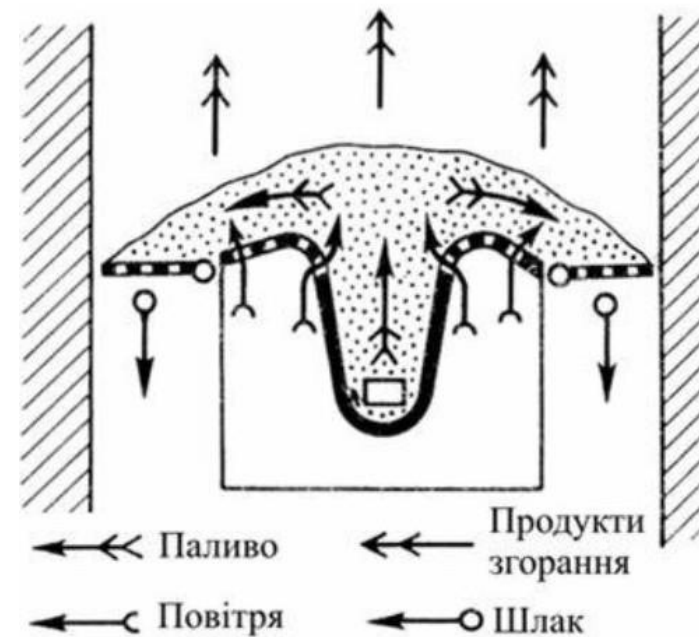
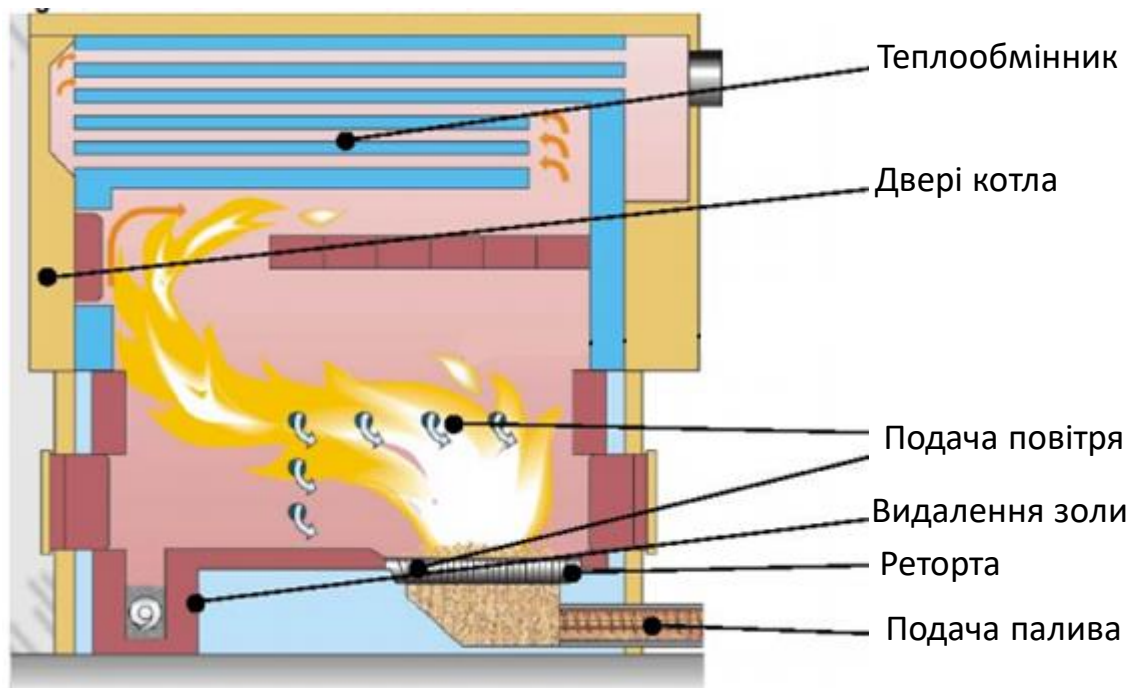


Вихровий предтопок

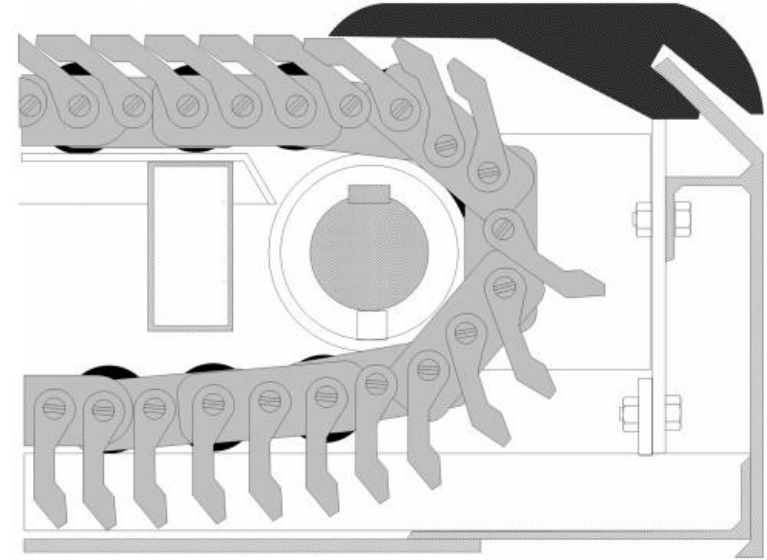
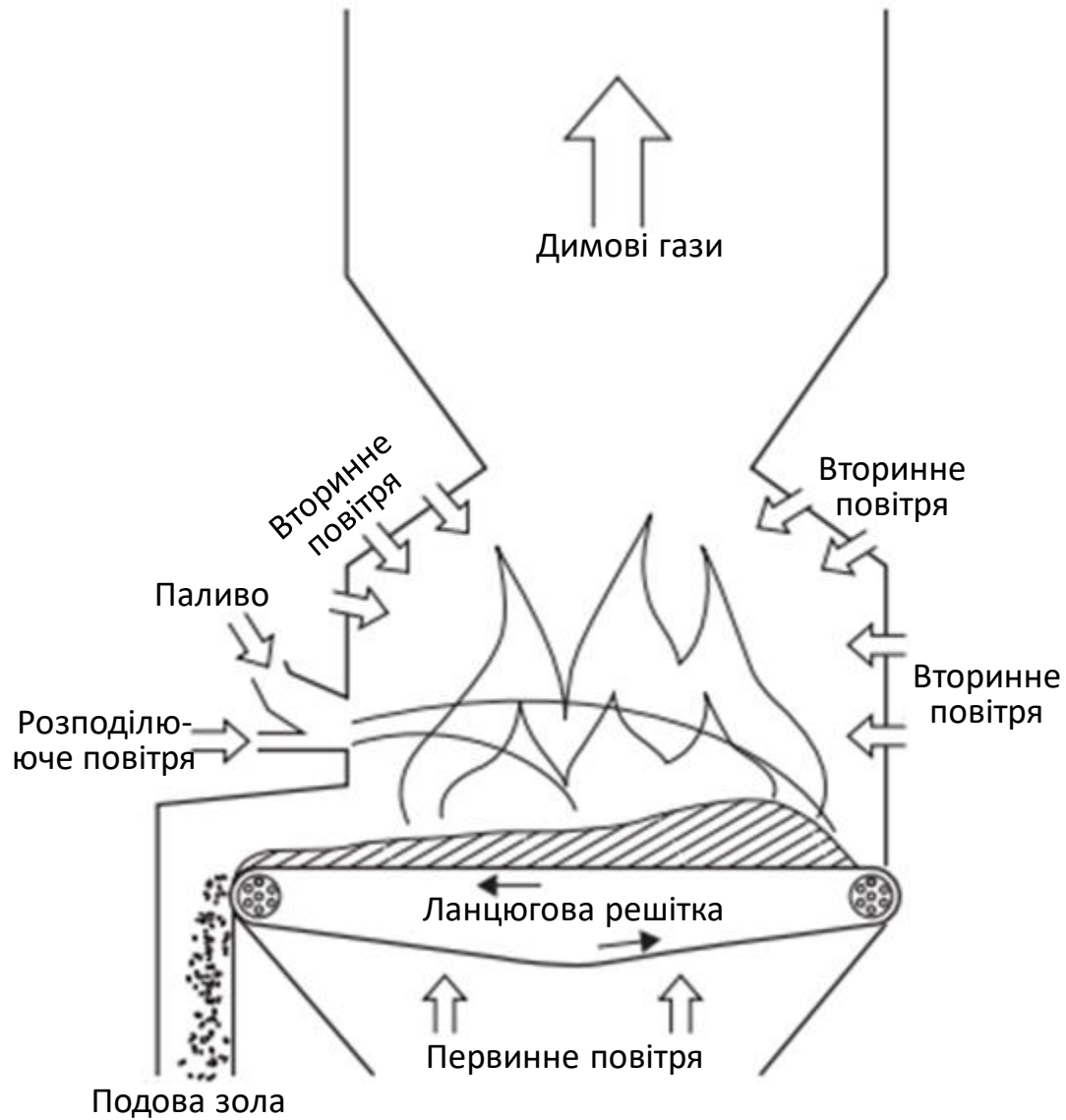
Котел з ретортним спалюванням



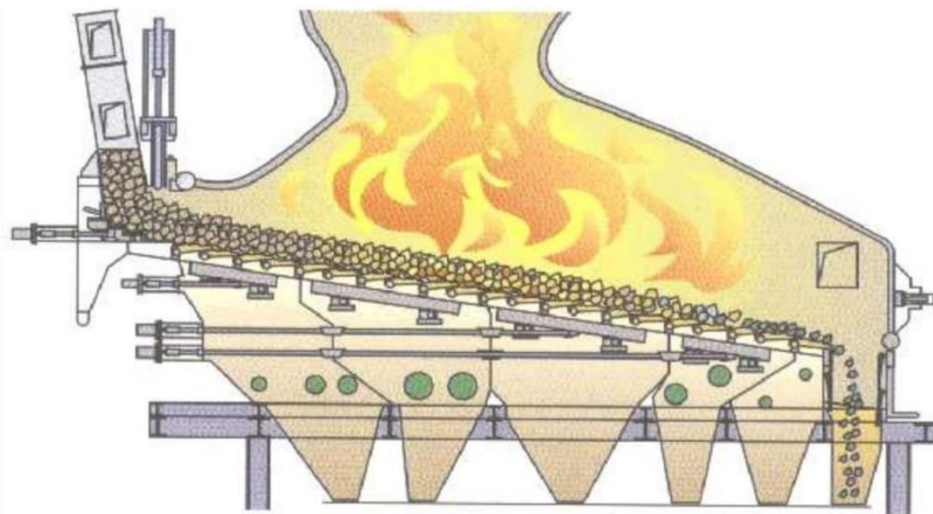
Реторта



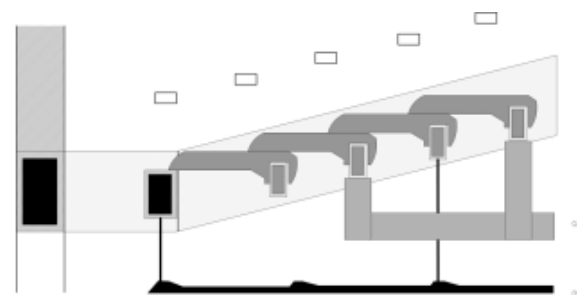
Спалювання на ланцюговій решітці



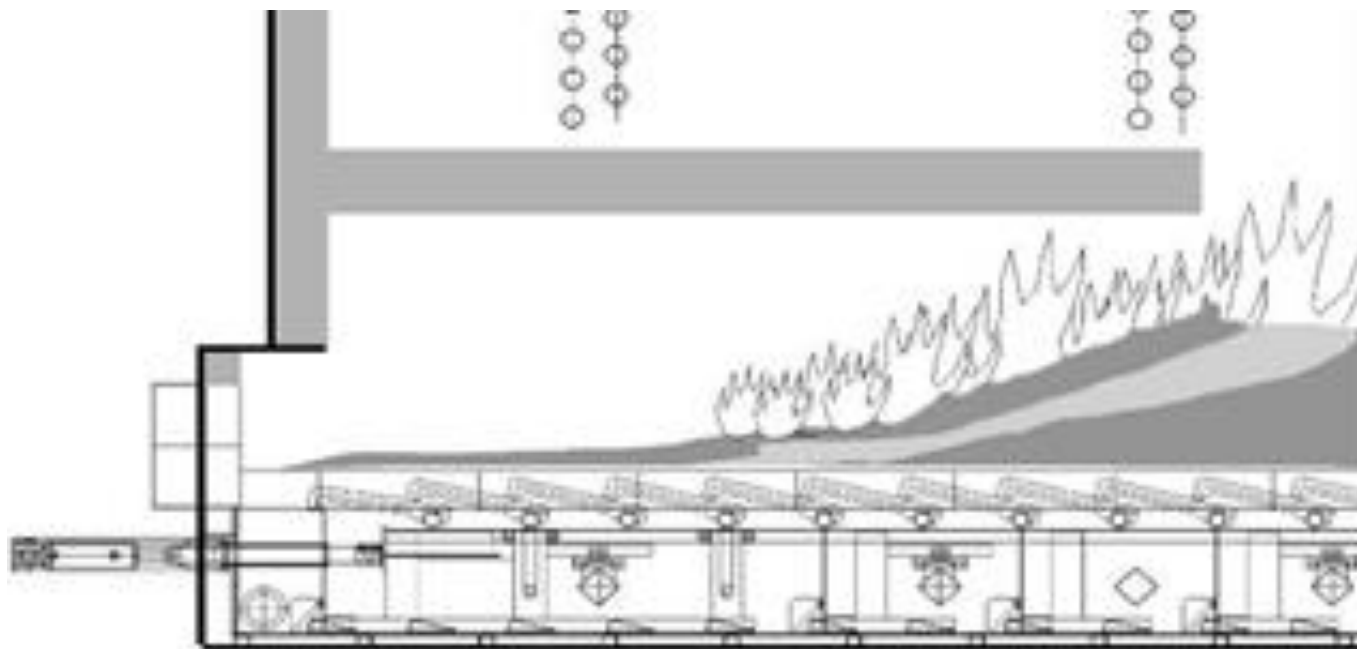
Спалювання на рухомій колосниковій та вібраційній решітках



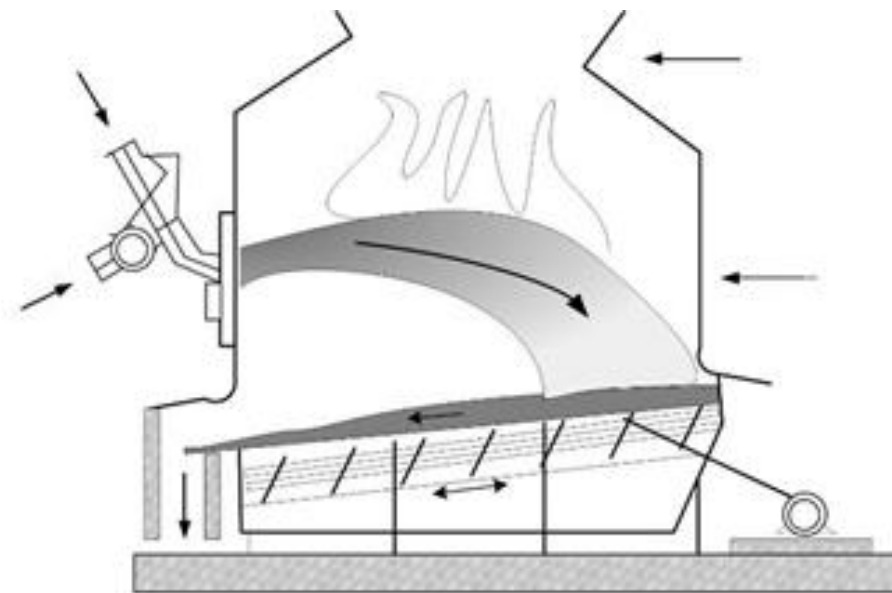
а) Похила перештовхувальна колосникова решітка



Елемент похилої перештовхувальної решітки

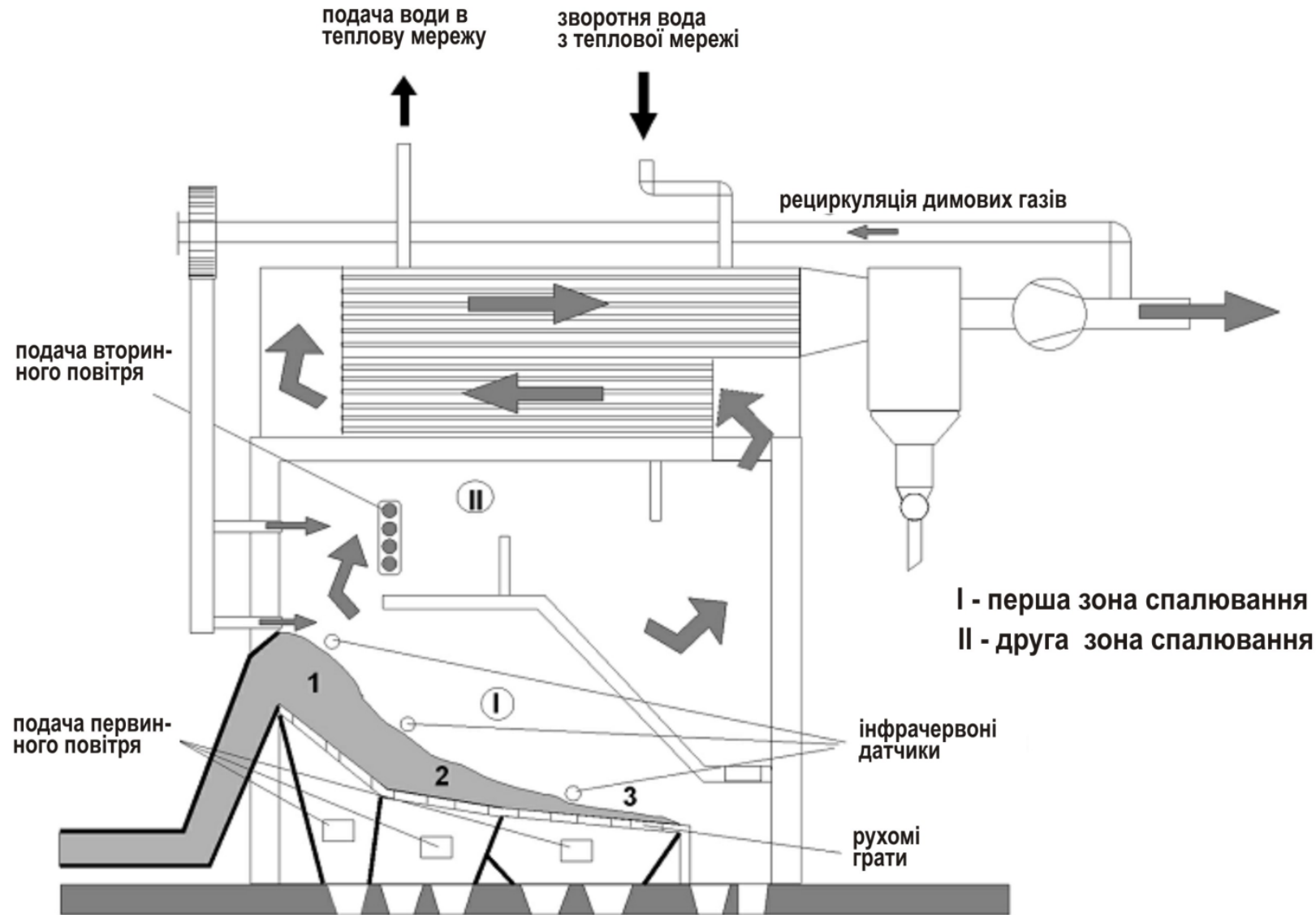


б) Горизонтальна перештовхувальна решітка



в) Спалювання на вібраційній решітці з пневмозакидачем палива

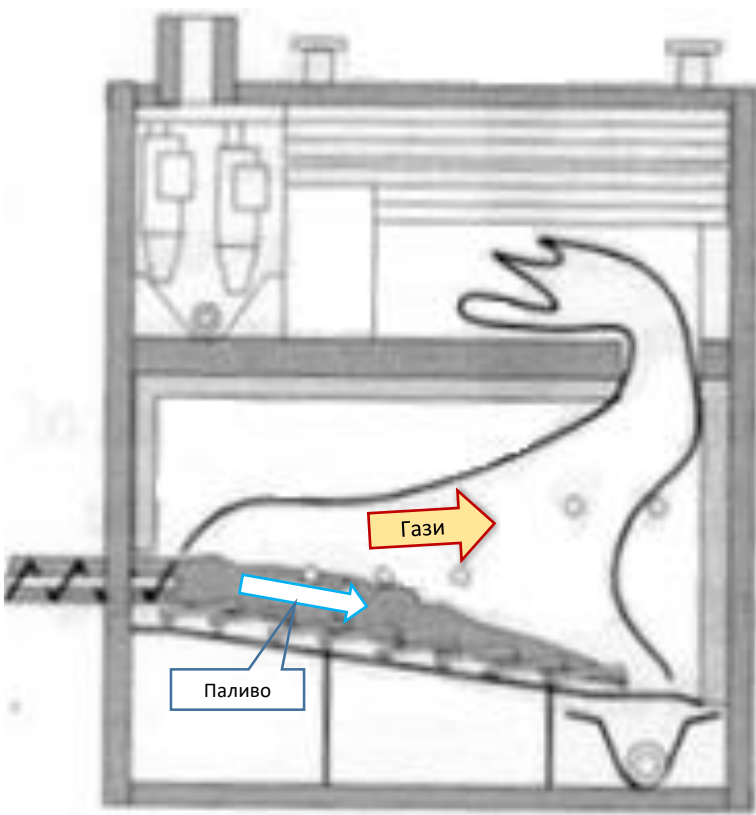
Сучасна технологічна концепція спалювання біомаси на решітці



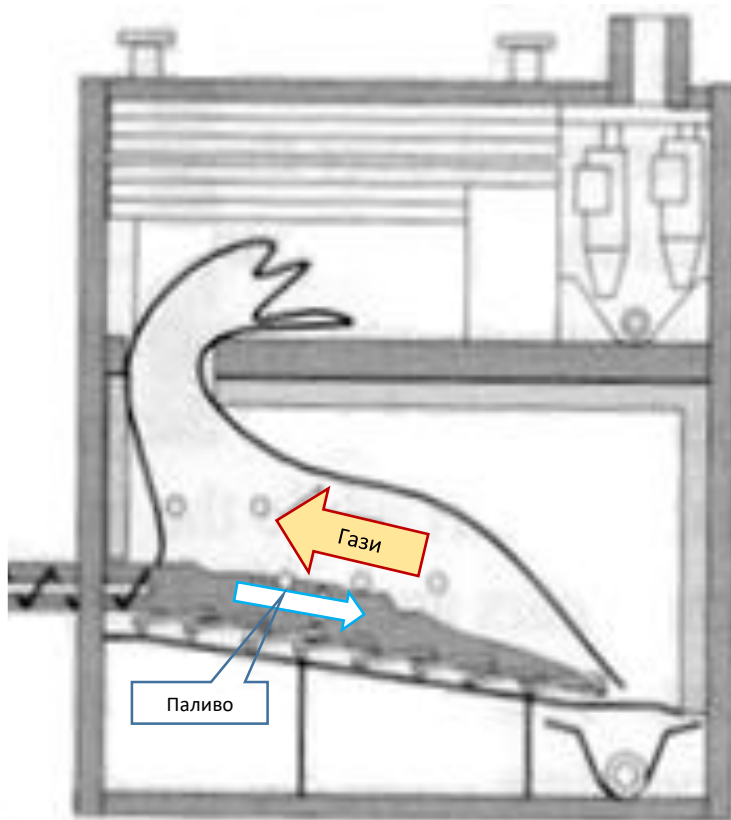
- ❖ Водяне охолодження стінок топки
- ❖ Рециркуляція димових газів в топку
- ❖ Водяне охолодження колосників решітки
- ❖ Обмурівка

Організація руху газів при спалюванні біомаси на ґратах

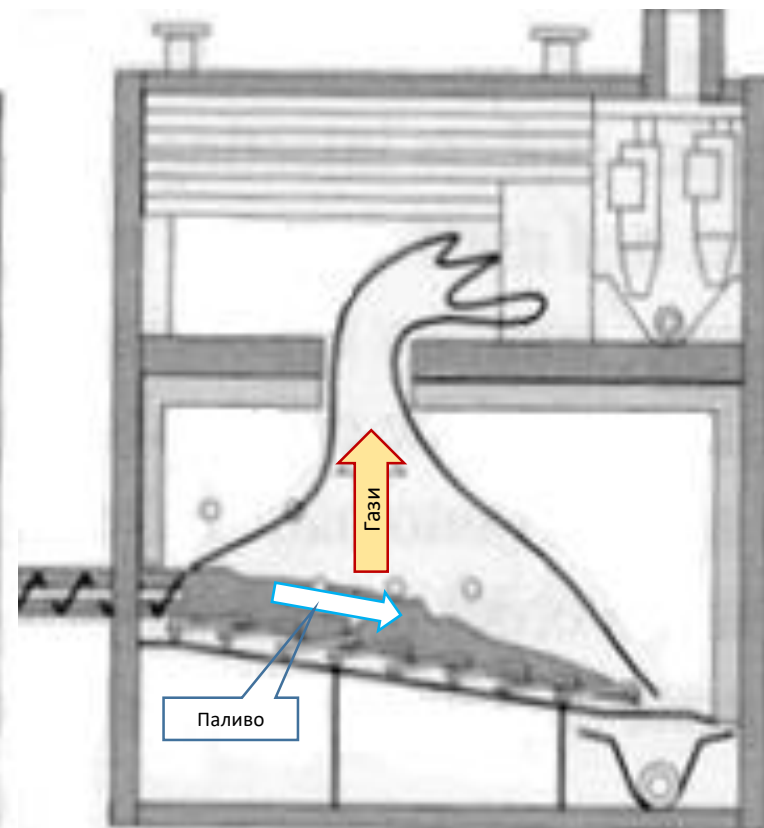
Прямотечійне



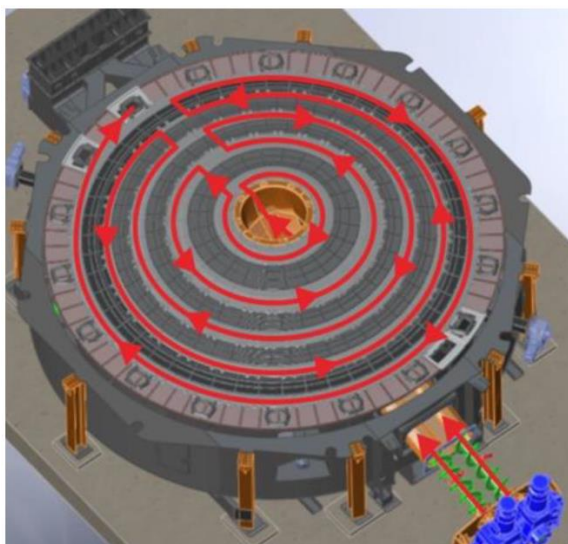
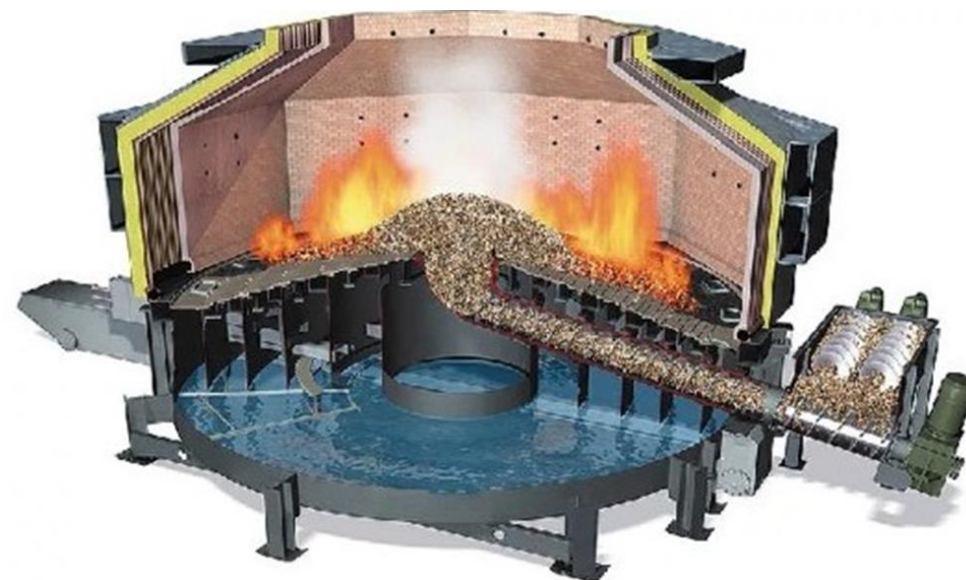
Протитечійне



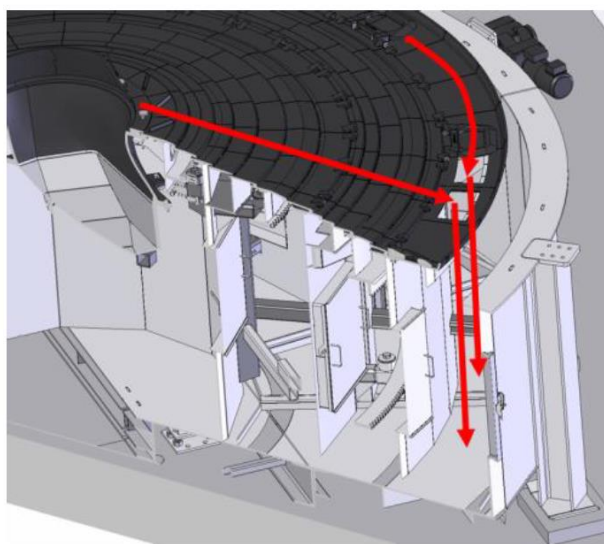
Перехресне



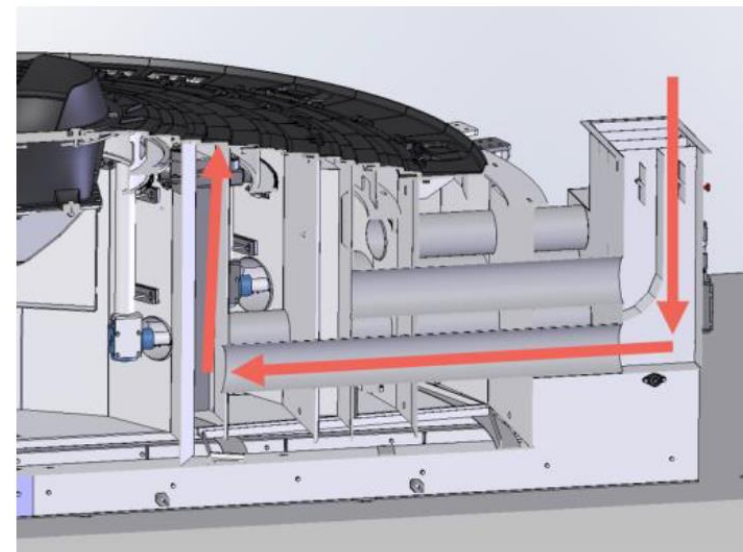
Спалювання на обертальній решітці



а



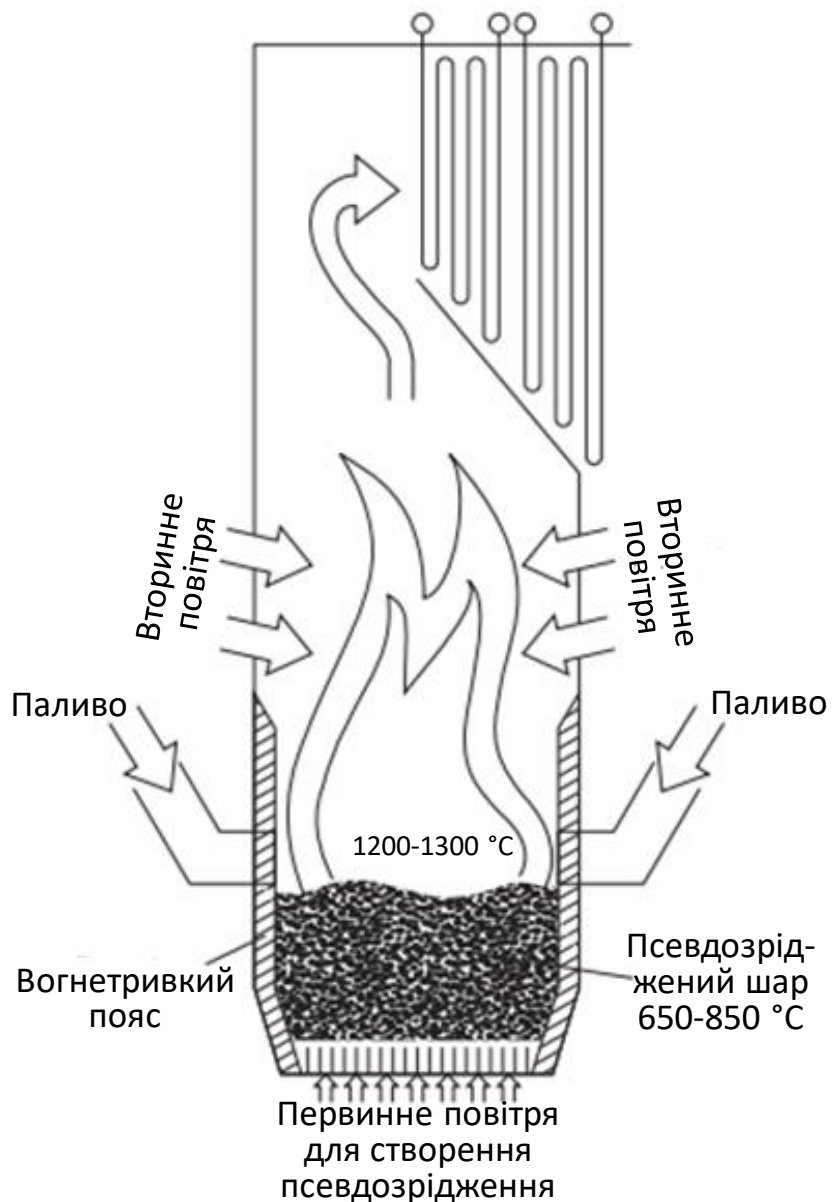
б



в

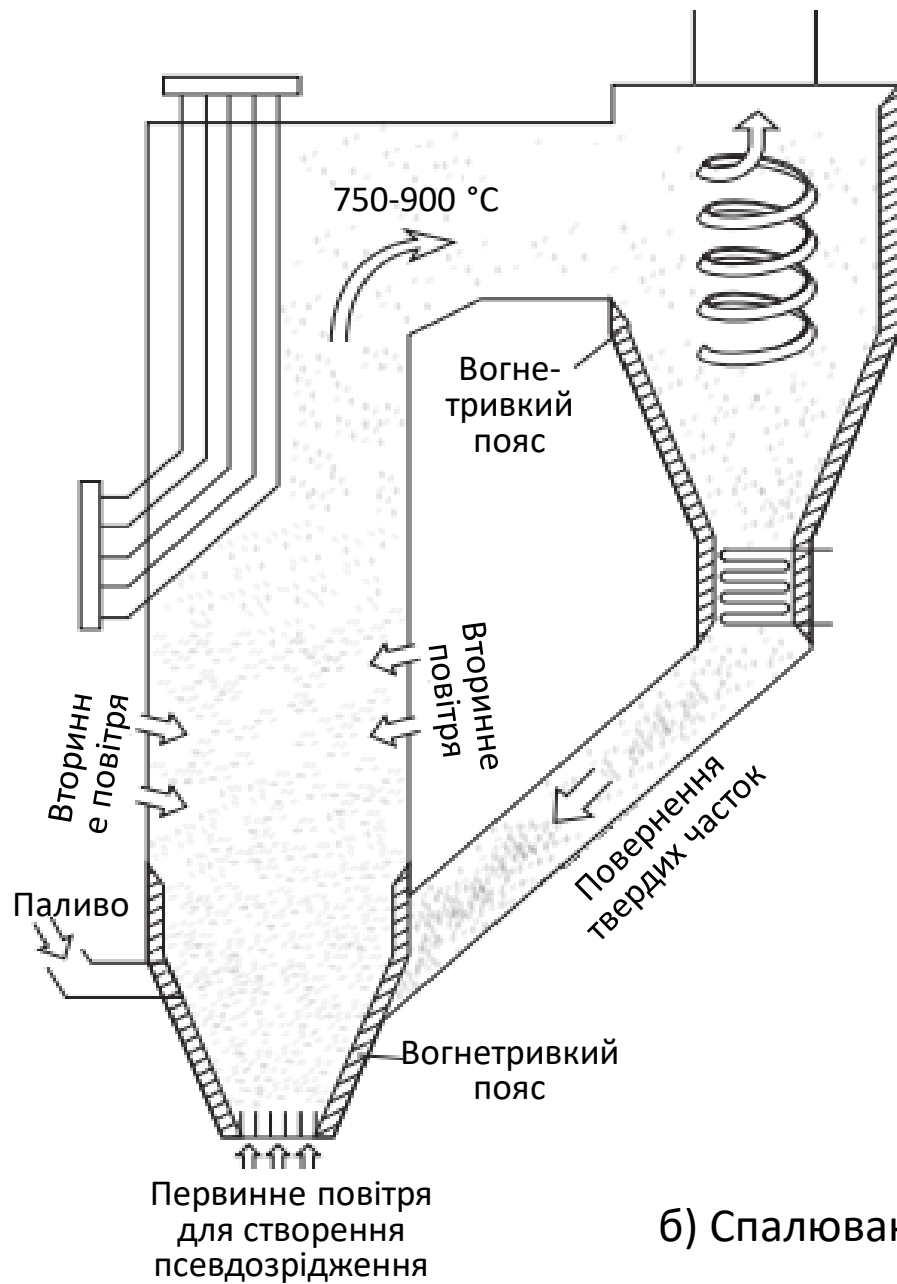
Напрями руху: а) колосників, б) шару палива по решітці в) первинного повітря

Спалювання в псевдозрідженому шарі



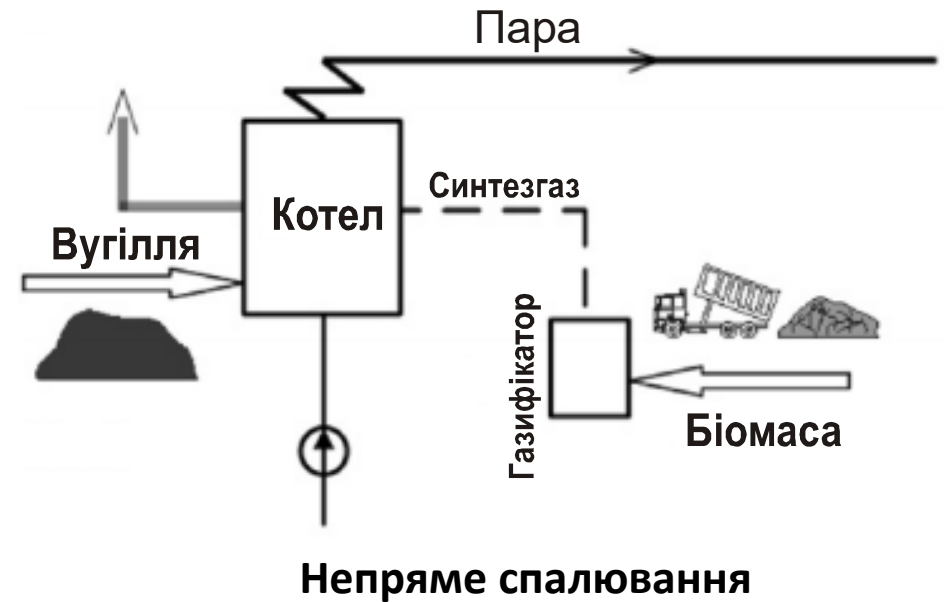
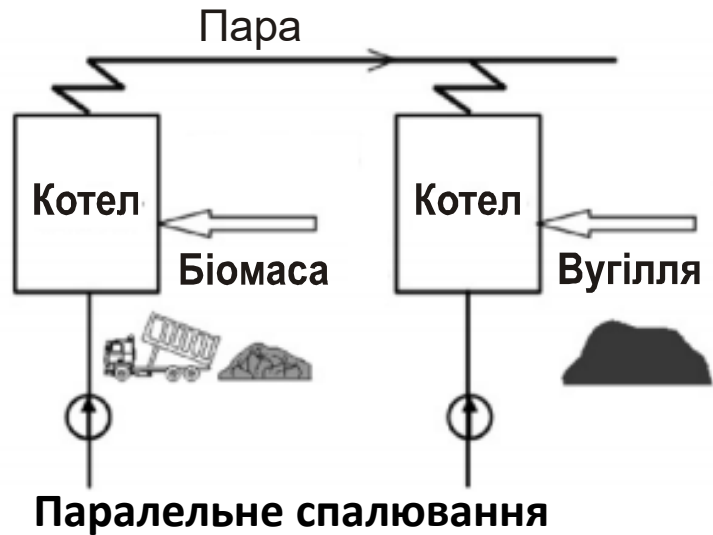
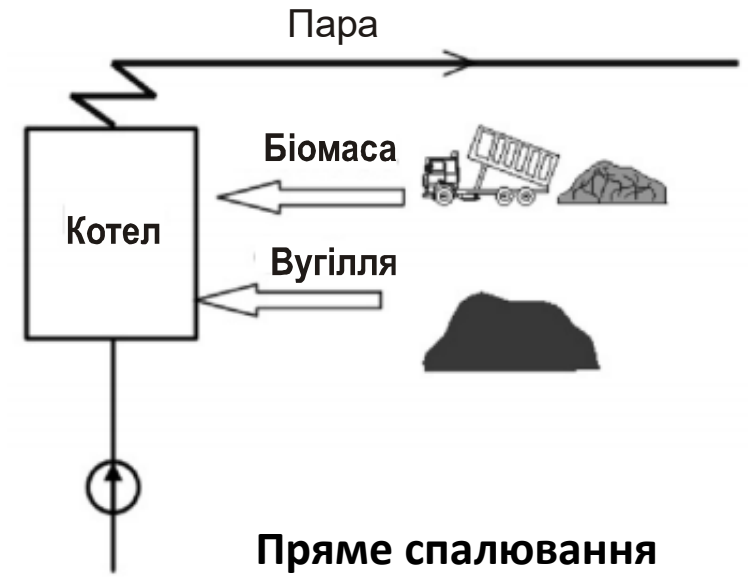
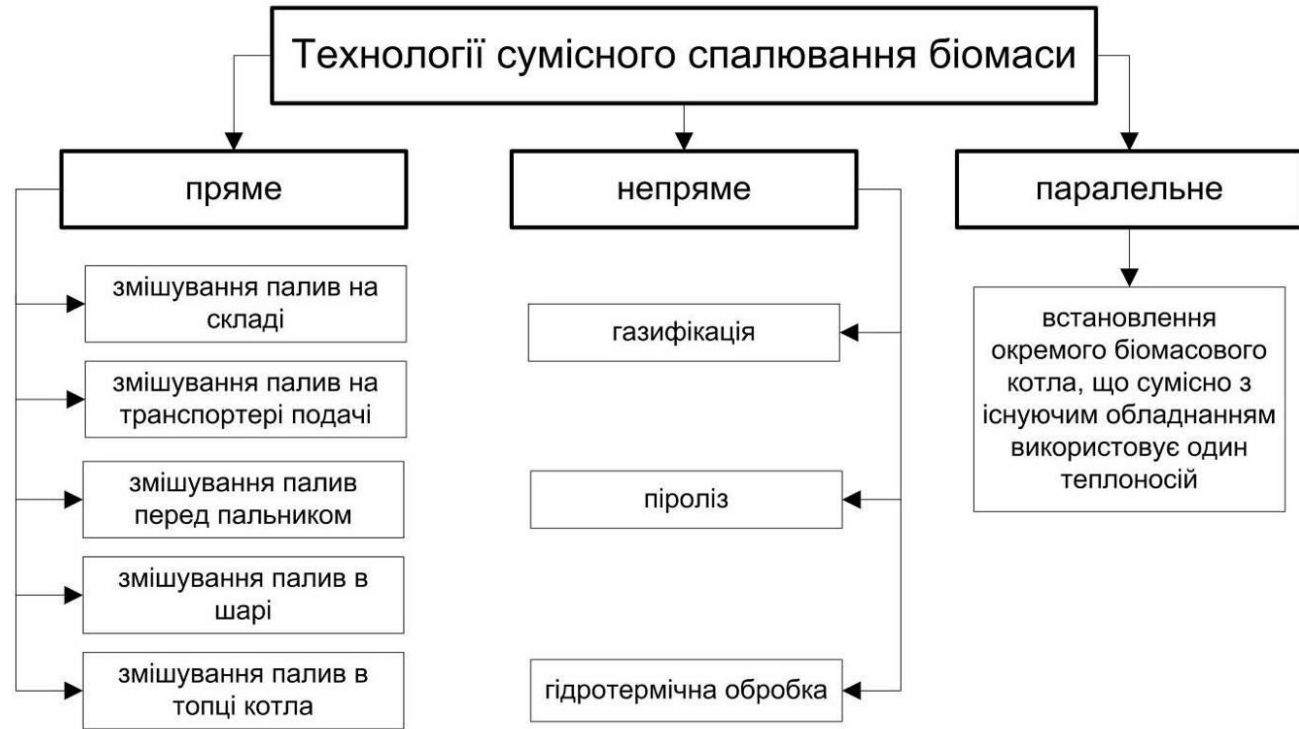
а) Спалювання в киплячому шарі

Фізико-хімічні основи спалювання біомаси



б) Спалювання в циркулюючому киплячому шарі

Сумісне спалювання

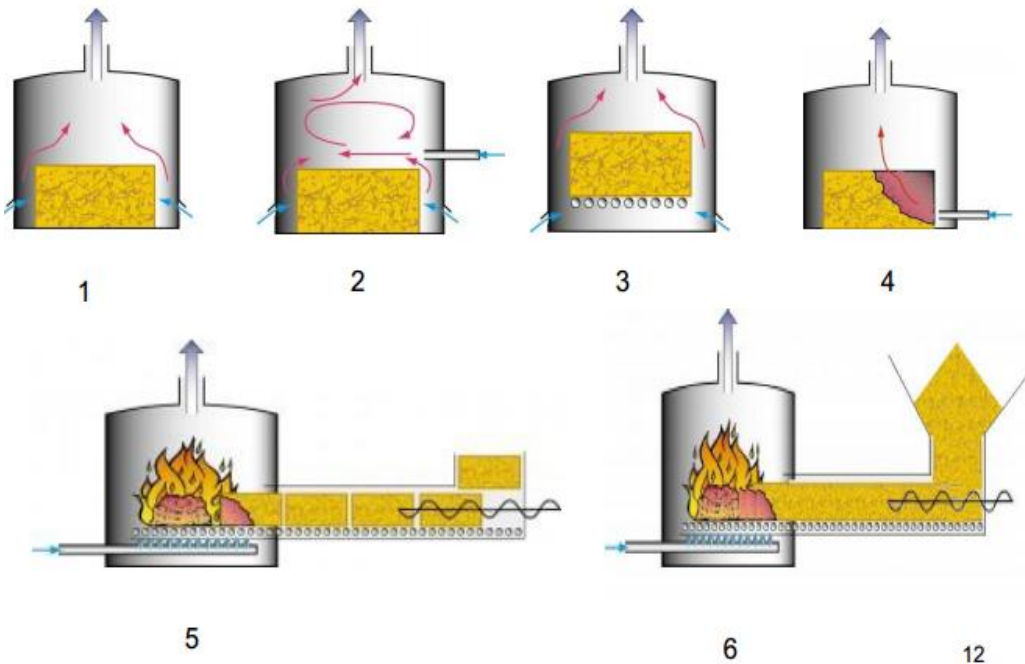


Особливості спалювання соломи

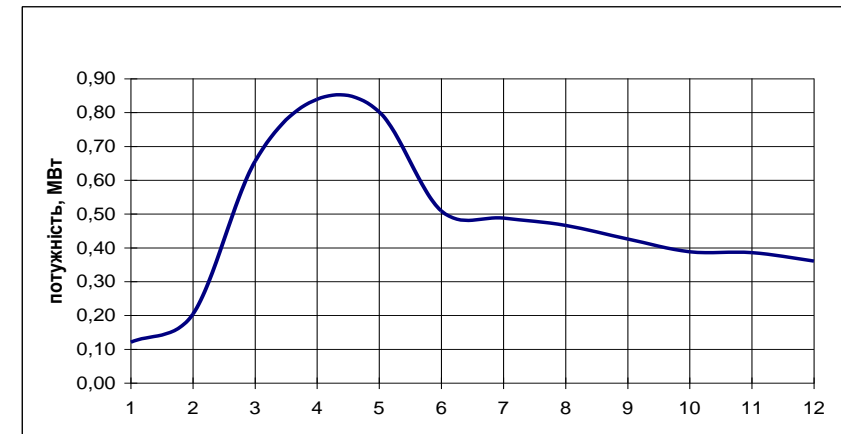
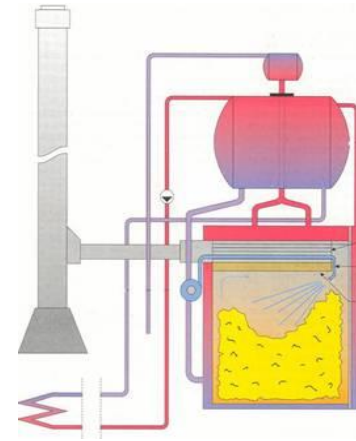
Швидкий вихід летких та важкість в їх допалюванні



Основні технології спалювання соломи



Теплогенератори потужністю до 1000 кВт для спалювання великих туків соломи під дією одиночних струменів дуттьового повітря

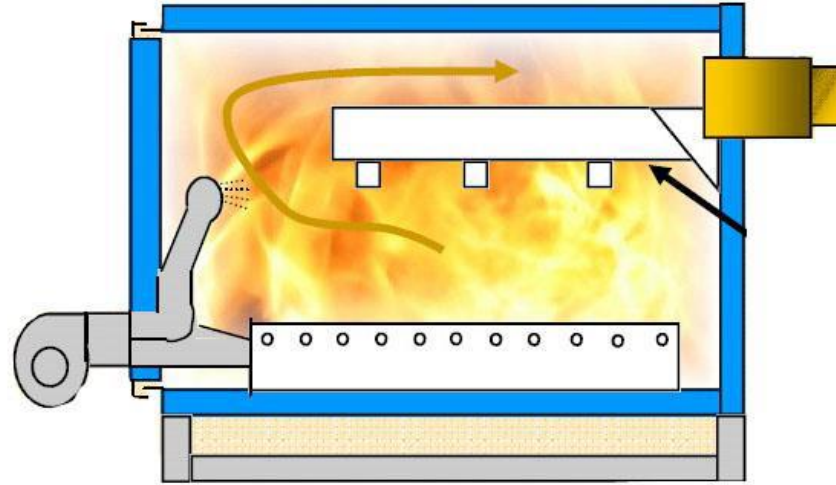


Зміна теплової потужності котла періодичної дії за цикл спалювання

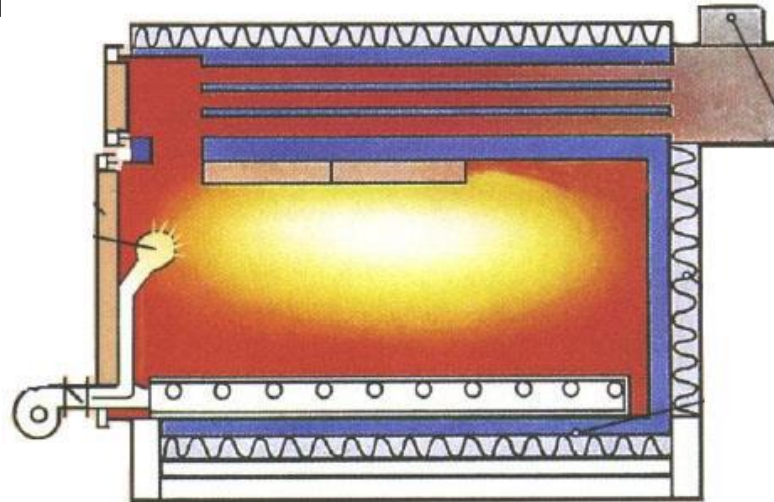
Спалювання малих тюків соломи



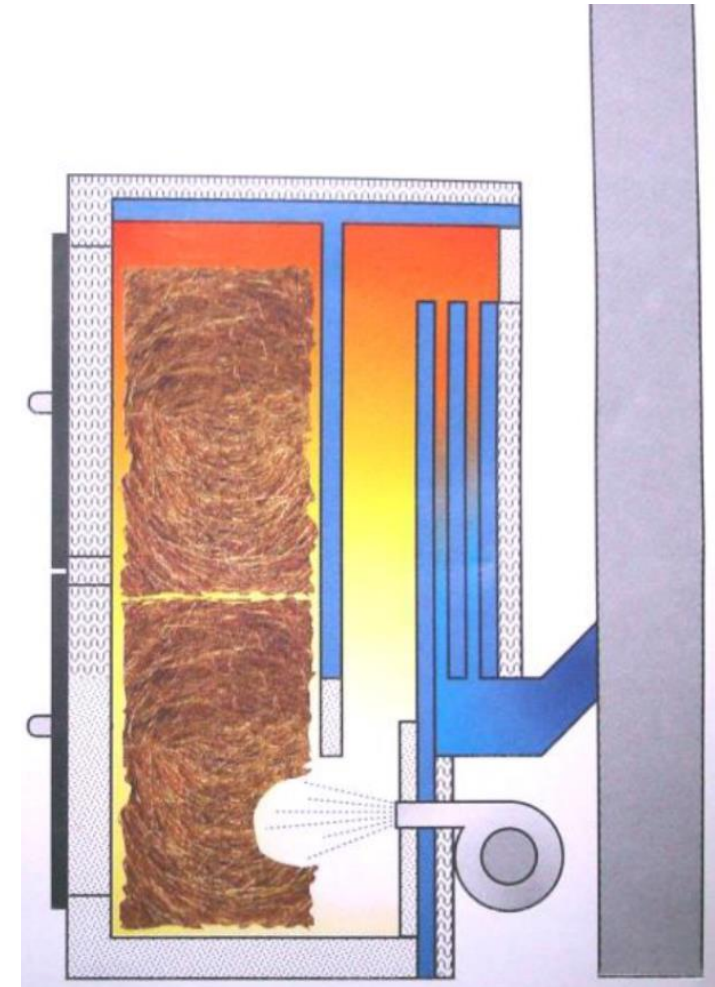
а) Спалювання на глухій черені з ручним регулюванням подачі повітря



б) Спалювання з термостатичним регулюванням подачі повітря

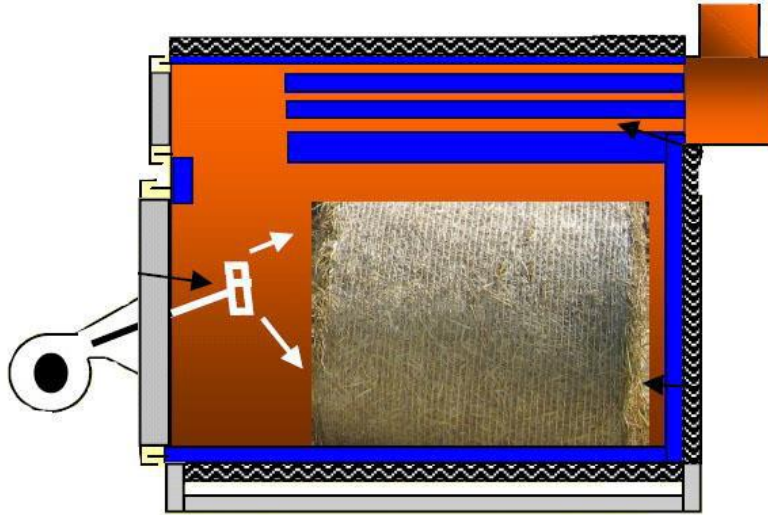


в) Спалювання на решітці з програмним регулюванням подачі повітря

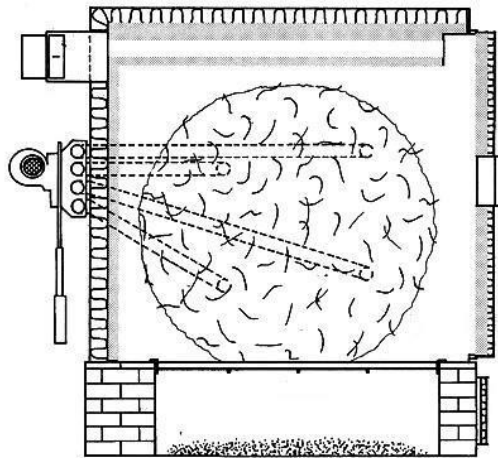


г) Спалювання з самоподачею тюків у зону горіння

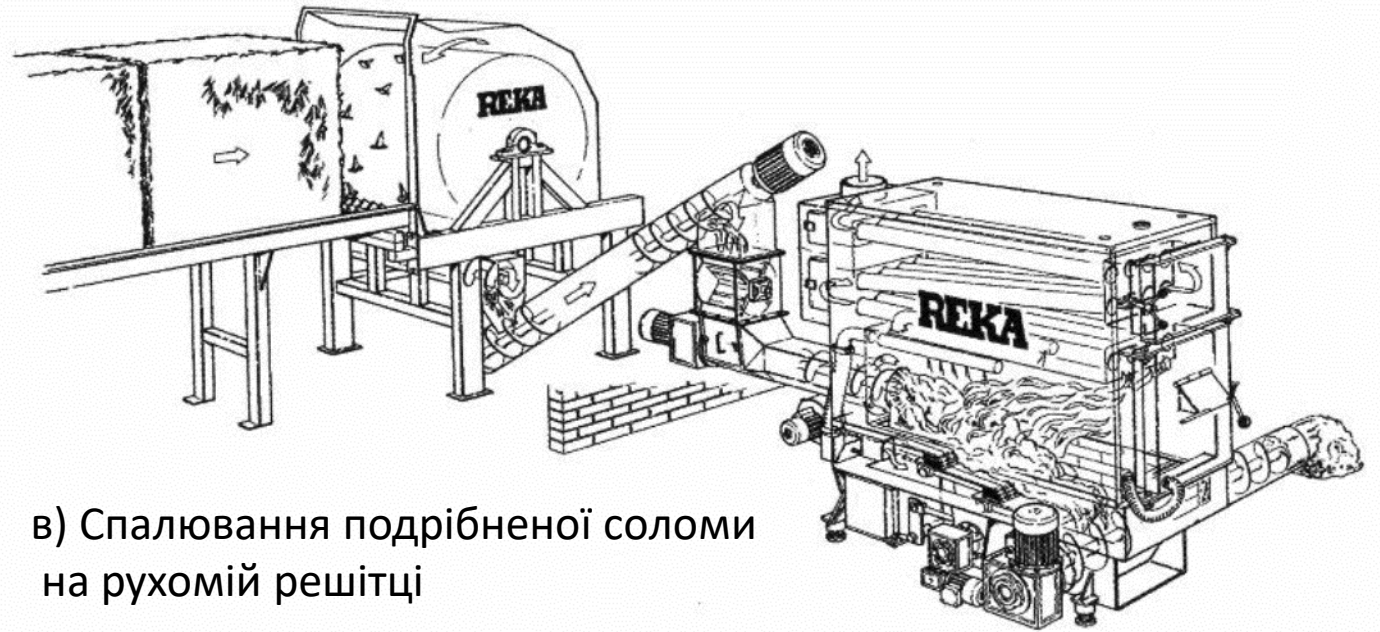
Спалювання великих тюків соломи



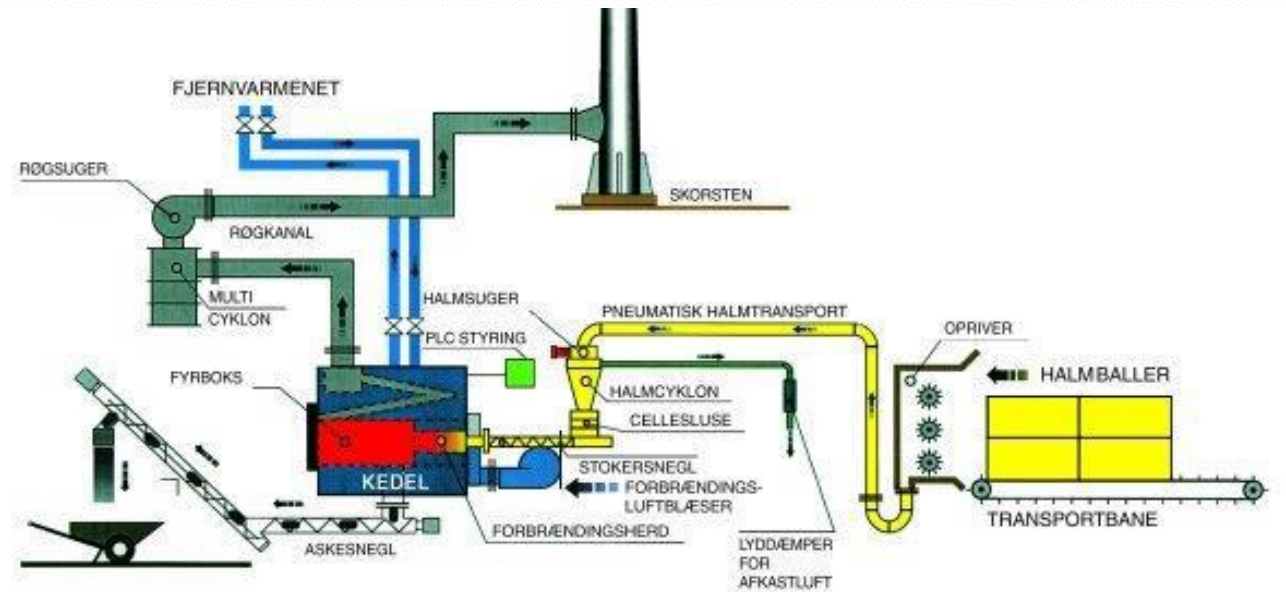
а) Спалювання з керованою зміною орієнтації струменів дуття



б) Спалювання з перемиканням зони введення дуття



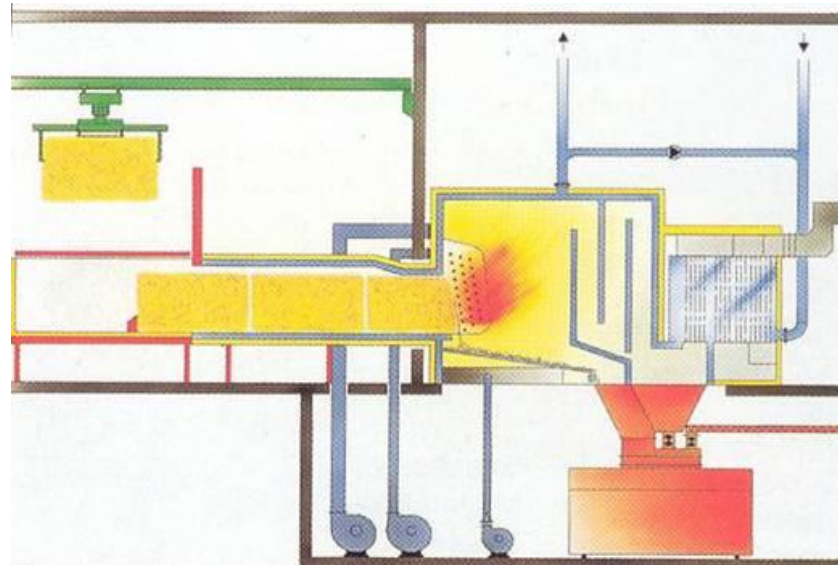
в) Спалювання подрібненої соломи на рухомій решітці



г) Спалювання подрібненої соломи з ретортною подачею

Спалювання тюків та гранул соломи

Сигарне спалювання цілих тюків соломи



Спалювання пелет з соломи

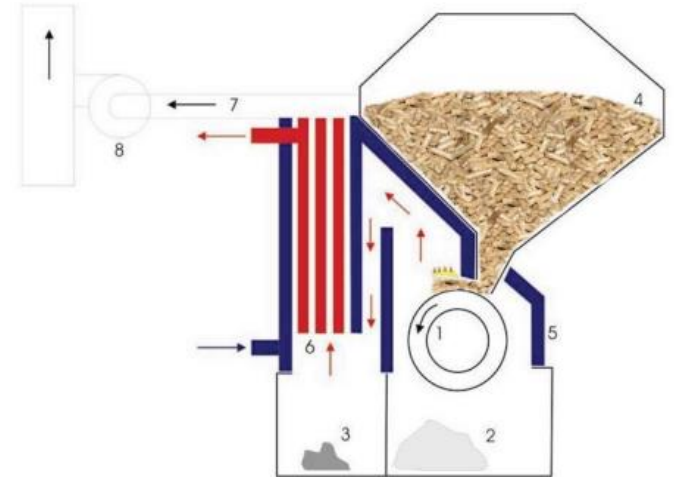
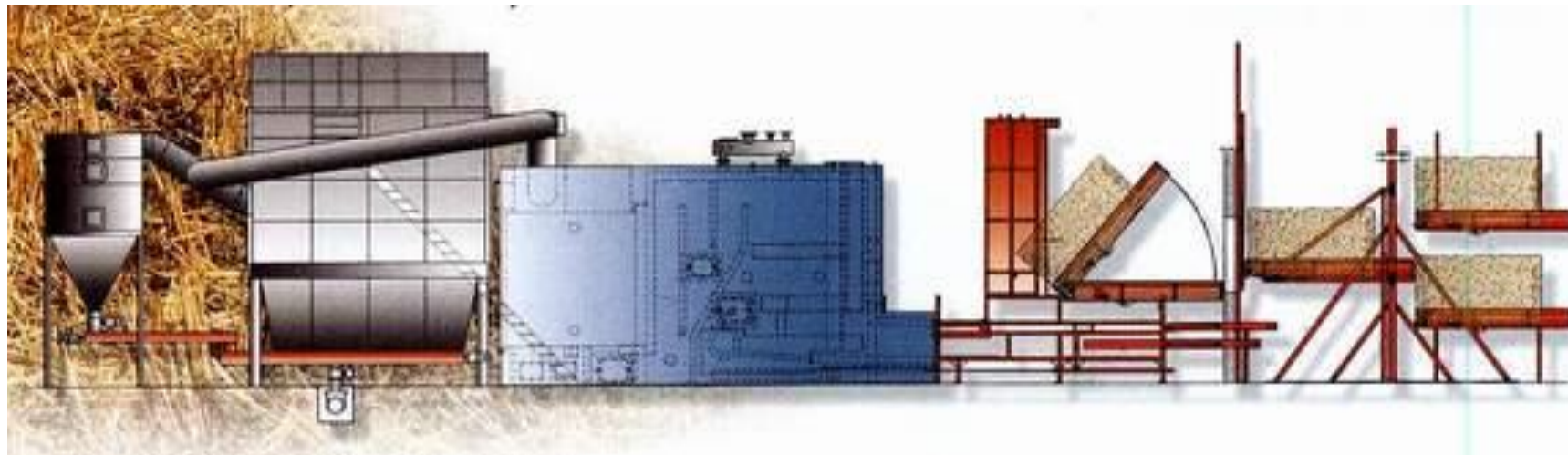


Схема котла Carborobot

Безперервне спалювання тюків соломи з попереднім розрізанням на частини



Технології спалювання біомаси за діапазонами потужності

Застосування	Тип	Типовий діапазон потужності	Палива	Вміст золи	Вологість
Ручне завантаження	дров'яні печі	2 кВт-10 кВт	суха стовбурова деревина	<2%	5%-20%
	котли на дровах	5 кВт-50 кВт	дрова, залишки деревини	<2%	5%-30%
Спалювання гранул	пелетні печі та котли	2 кВт-25 кВт	деревні пелети	<2%	8%-10%
Автоматична подача палива	топки з нижньою подачею (реторта)	20 кВт-2,5 МВт	деревна тріска, деревні відходи	<2%	5%-50%
	топки з рухомими колосниками	150 кВт-15 МВт	всі види деревного палива та більшість видів біомаси	<50%	5%-60%
	предтопки з решіткою	20 кВт-1,5 МВт	суха деревина (залишки)	<5%	5%-35%
	нижня подача з обертовою решіткою	2 МВт-5 МВт	деревна стружка, високий вміст вологи	<50%	40%-65%
	сигарне спалювання	3 МВт-5 МВт	тюки соломи	<5%	20%
	спалювання цілих тюків	200 кВт-5 МВт	цілі тюки	<5%	20%
	топки для соломи	100 кВт-5 МВт	тюки соломи з подрібненням тюків	<5%	20%
	стаціонарний киплячий шар	5 МВт-15 МВт	різноманітна біомаса, d < 10 мм	<50%	5%-60%
	циркулюючий киплячий шар	15 МВт-100 МВт	різноманітна біомаса, d < 10 мм	<50%	5%-60%
	камерне пилове спалювання в потоці	5 МВт-10 МВт	різноманітна біомаса, d < 5 мм	<5%	<20%
Сумісне спалювання*	стаціонарний киплячий шар	Сумарно 50 МВт-150 МВт	різноманітна біомаса, d < 10 мм	<50%	5%-60%
	циркулюючий киплячий шар	Сумарно 100-300 МВт	різноманітна біомаса, d < 10 мм	<50%	5%-60%
	пальник для сигар	Солома: 5 МВт-20 МВт	тюки соломи	<5%	20%
	пилове спалювання у вугільних котлах	Сумарно 100 МВт-1 ГВт	різноманітна біомаса, d < 2-5 мм	<5%	<20%

* Зазвичай біомаса становить менше 10% від загального споживання палива.

Технології подачі та спалювання відповідно до форми та розміру паливної біомаси

Форма	Максимальний розмір частинок	Відповідна система завантаження	Відповідна технологія спалювання
Сипучий матеріал	< 5 мм	Пряме впорскування, пневматичні конвеєри	Пряме спалювання, циклонні пальники, ЦКШ
Сипучий матеріал	< 50 мм	Конвеєри шнекові, стрічкові конвеєри	Топки з нижньою подачею, колосникові топки. БКШ, ЦКШ
Сипучий матеріал	< 100 мм	Вібротранспортери, ланцюгові жолобкові транспортери, гідропоршневі живильники	Колосникові топки, БКШ
Сипучий матеріал	< 500 мм	Конвеєри роликові, ланцюгові лоткові	Колосникові топки, БКШ
Подрібнені або нарізані тюки	< 50 мм	Дробарки/млини, а потім пневматичні конвеєри, гвинтові конвеєри або стрічкові конвеєри	Пряме спалювання, колосникові печі, БКШ, ЦКШ
Тюки, розділені тюки	цілі тюки	Крани, гідравлічні поршневі живильники	Колосникові топки, пальники для сигарного спалювання
Гранули	< 30 мм	Конвеєри шнекові, стрічкові конвеєри	Топки з нижньою подачею, колосникові топки, БКШ, ЦКШ
Брикети	< 120 мм	Конвеєри роликові, ланцюгові лоткові	Колосникові топки, БКШ

Виробники обладнання для спалювання біомаси середньої та великої потужності

Технологія спалювання	Виробник
В шарі з нижньою подачею палива	Polytechnik (Австрія), Danstoker (Данія), HURST (США), AXIS Industries (Литва)
На рухомій решітці	KARA (Нідерланди), Polytechnik (Австрія), HURST (США), AXIS Industries (Литва), Wuncke (Бельгія), B&W (США), БИКЗ (Росія), Bioner, Aalborg (Данія)
На вібраційній решітці	Bioner, FLS Miljo, Ansaldo, Volund (Данія), BWE (Італія), B&W (США), KIRKA SURI (Фінляндія)
Камерне спалювання	Енергомашпроект (Україна), Wuncke (Бельгія), HURST (США), Rafako, Stalowa Wola (Польща)
Спалювання в КШ	B&W (США), ONINEN (Фінляндія)
Спалювання в ЦКШ	B&W (США), Foster Wheeler, Alhstrom (США)

Основні переваги та недоліки технологій спалювання

Переваги	Недоліки
Спалювання на решітці	
<ul style="list-style-type: none">– низькі інвестиційні витрати для станцій потужністю < 20 МВт– низькі експлуатаційні витрати– низький рівень твердих часток в димових газах– менша чутливість до зашлакованості	<ul style="list-style-type: none">– неефективне спалювання суміші різних видів БМ й трав'янистої БМ– зниження NOx потребує спеціальних додаткових заходів– високий коефіцієнт надлишку повітря (5-8%), що знижує теплову ефективність– неоднорідність згорання– потрібне вдосконалене керування процесом для зниження рівня викидів при понижених навантаженнях
Спалювання з нижньою подачею палива	
<ul style="list-style-type: none">– низькі інвестиційні витрати для станцій потужністю < 6 МВт– проста та надійна конструкція, простота керуванням– низькі викиди при знижених навантаженнях	<ul style="list-style-type: none">– використовується для біомаси з низьким рівнем золи в паливі та для палив з високою температурою плавлення золи– обмеження по розміру часток палива, <50 мм

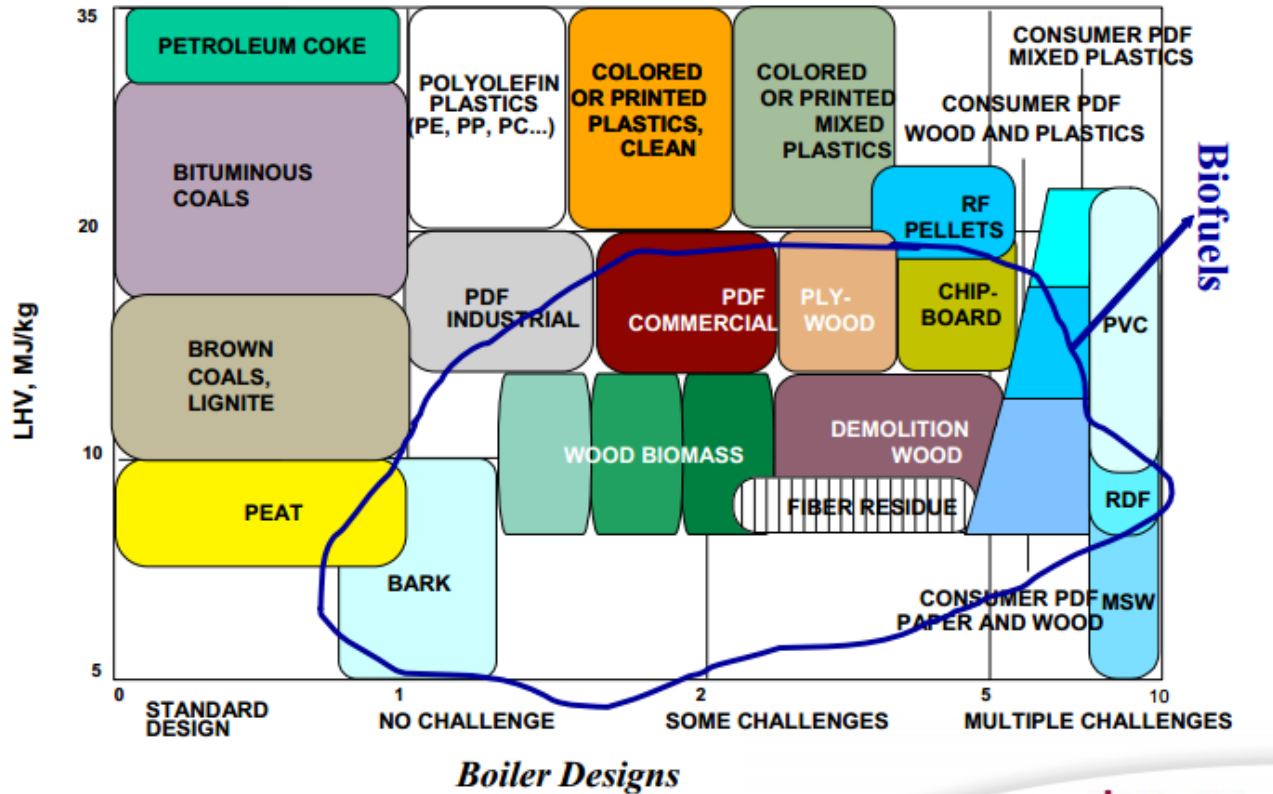
Основні переваги та недоліки технологій спалювання

Переваги	Недоліки
Спалювання в киплячому шарі	
<ul style="list-style-type: none">– відсутність рухомих частин в гарячі зоні топки котла– низький рівень емісії– висока гнучкість по відношенню до типу палива та його вологості– низький рівень надлишку повітря (3-4%), що підвищує ефективність	<ul style="list-style-type: none">– високі інвестиційні витрати– високі експлуатаційні витрати– застосовується для великих установок потужністю > 20 МВт– обмеження по розміру часток < 80 мм– обмеження по використанню палив з високим вмістом лужних металів– висока концентрація пилу в димових газах– втрата інертного матеріалу– необхідність розпалювального пальника

Основні переваги та недоліки технологій спалювання

Переваги	Недоліки
Спалювання в циркулюючому киплячому шарі	
<ul style="list-style-type: none"> — відсутність рухомих частин в гарячі зоні топки котла — низький рівень емісії — висока гнучкість по відношенню до типу палива та його вологості — однорідність умов протікання спалювання — висока ефективність теплопередачі — можливість використання добавок — дуже низький рівень надлишку повітря (1-2%), що підвищує ефективність 	<ul style="list-style-type: none"> — високі інвестиційні витрати — високі експлуатаційні витрати — інтерес до установок потужністю > 30 МВт — обмеження по розміру часток < 40 мм — обмеження по використанню палив з високим вмістом лужних металів — висока концентрація пилу в димових газах — втрата інертного матеріалу — висока інтенсивність спікання золи — необхідність розпалювального пальника
Пилове спалювання	
<ul style="list-style-type: none"> — низький рівень надлишку повітря (4-6%), що сприяє підвищеній ефективності — зниження емісії NOx шляхом ступеневого спалювання — маневреність та просте керування потужністю 	<ul style="list-style-type: none"> — обмеження по розміру часток 10-20 мм — стирання ізоляції кладки — необхідність розпалювального пальника

Технологічні проблеми при спалюванні біомаси



Dalkia

- ❖ Занадто сухе паливо
 - Небезпека перегріву та пошкодження решітки
 - Розплавлення золи / склоутворення
 - Агломерація в шарі палива та з вогнетривами
 - Агломерація інертних матеріалів киплячого шару в технологіях КШ, ЦКШ
 - Може знадобитися рециркуляція (для контролю рівня кисню та регулювання горіння – технологія КШ)
 - ❖ Зольність, сторонні домішки
 - Плавлення золи, агломерація, перевантаження систем золовидалення
 - Сторонні тіла, блокування подачі палива
- ❖ Занадто запилене паливо (тирса, солома, ...)
 - Забруднення в котельні та навколо паливозавантажувальної станції
 - Ризик пожежі та вибуху (у котлі, повітроводах і обробці димових газів)
 - Неповне згорання в топці (на колосниках) і догорання по ходу газів
 - більш холодний шар в технологіях КШ, ЦКШ
 - ❖ Надто вологе паливо
 - Схильність до замерзання, утворення містків
 - Перевантаження паливоприймального пункту, конвеєрів
 - Зменшена потужність котла (обмежений об'єм палива, надмірна температура димових газів, необхідність додавання більш дорогого палива)
 - Знижена ефективність (неповне згорання, якщо паливо не є однорідним)

Проблеми, які виникають при спалюванні агробіомаси



Відкладення всередині топки



Відкладення на трубах



Спінання золи



Відкладення на пароперегрівачі



Хлорна корозія пароперегрівача



Відкладення на конвективних поверхнях

Зольні компоненти деревної біомаси

Параметр		Деревина без кори		Кора дерев		Порубкові залишки		Верба енерго-плантацій
		хвойні	листяні	хвойні	листяні	хвойні	листяні	
Зола	% до м.с.р.	0,3	0,3	4,0	5,0	2,0	1,5	2,0
Al	мг/кг с.р.	100	20	800	50	-	-	-
Ca	мг/кг с.р.	900	1200	5000	15000	5000	4000	5000
Fe	мг/кг с.р.	25	25	500	100	-	-	100
K	мг/кг с.р.	400	800	2000	2000	2000	1500	3000
Mg	мг/кг с.р.	150	200	1000	500	800	250	500
Mn	мг/кг с.р.	147	83	500	190	251	120	97
Na	мг/кг с.р.	20	50	300	100	200	100	-
P	мг/кг с.р.	60	100	400	400	500	300	800
Si	мг/кг с.р.	150	150	2000	10000	3000	150	-
Ti	мг/кг с.р.	<20	< 20	-	-	-	-	10
As	мг/кг с.р.	<0,1	<0,1	1	-	0,3	-	<0,1
Cd	мг/кг с.р.	0,1	0,1	0,5	0,5	0,2	0,1	2
Cr	мг/кг с.р.	1	1	5	5	-	-	1
Cu	мг/кг с.р.	2	2	5	5	-	-	3
нд	мг/кг с.р.	0,02	0,02	0,05	<0,05	0,03	0,02	<0,03
Ni	мг/кг с.р.	0,5	0,5	10	10	-	-	0,5
Pb	мг/кг с.р.	2	2	4	5	3	5	0,1
V	мг/кг с.р.	<2	<2	1	-	-	-	-
Zn	мг/кг с.р.	10	10	100	50	-	-	70
Cl	% до м.с.б.р.	0,01	0,01	0,02	0,02	0,01	0,01	0,03
S		0,02	0,02	0,1	0,1	0,04	0,04	0,05

В таблиці позначено: до м.с.р. – до маси сухих речовин; /кг с.р. – на кг сухих речовин; до м.с.б.р. – до маси сухої беззольної речовини

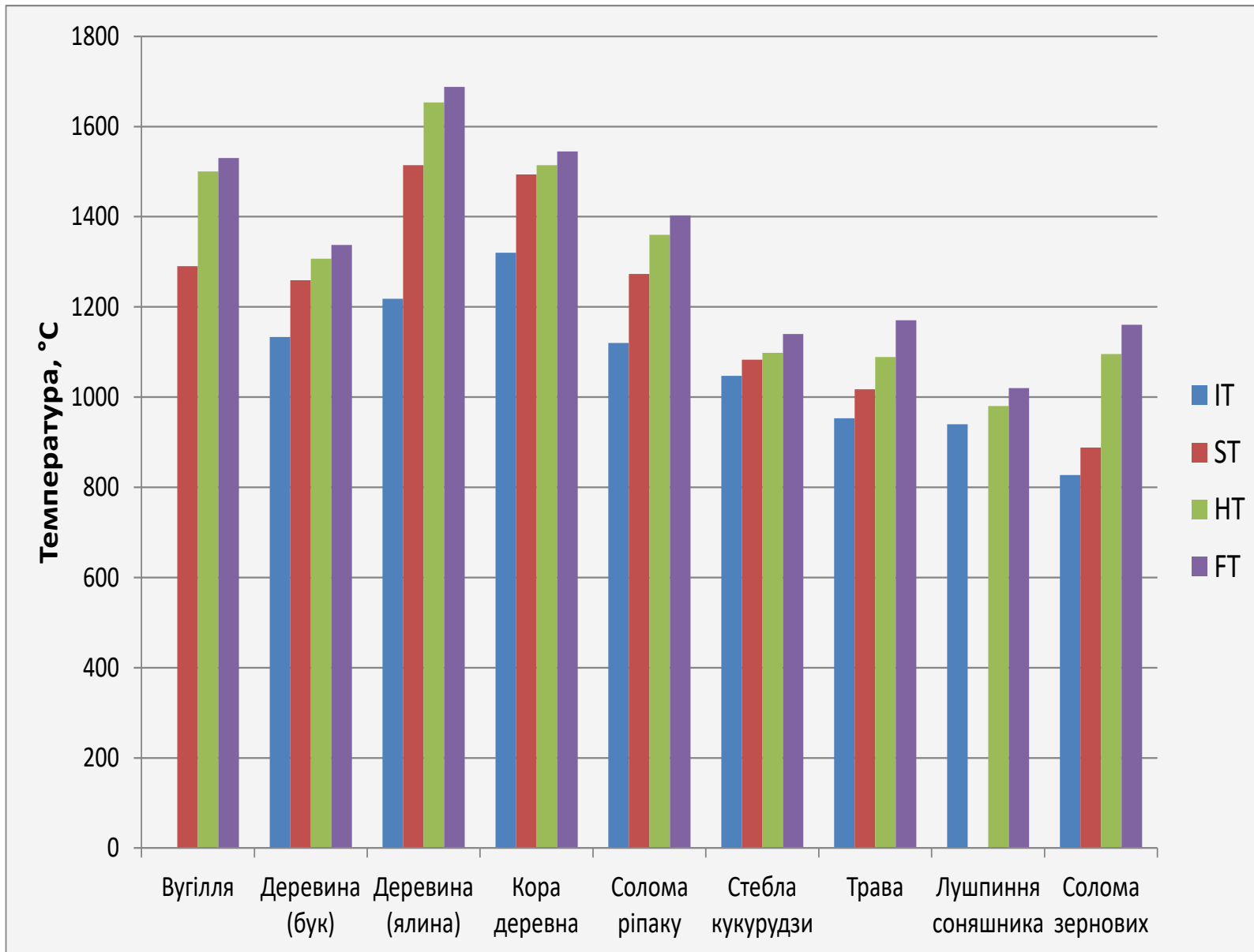
Зольні компоненти трав'янистої біомаси

Параметр/ Од. вимір.		Солома пшениці, жита, ячменю	Солома ріпаку	Зерно пшениці, жита, ячменю	Міскантус	Очерет	Трав'янисті рослини загалом
Зола	% до м.с.р.	5,0	5,0	2,0	4,0	6,4	7,0
Al	мг/кг с.р.	50	50	-	-	-	200
Ca	мг/кг с.р.	4000	15000	500	2000	3500	3500
Fe	мг/кг с.р.	100	100		100		600
K	мг/кг с.р.	10000	10000	5000	7000	12000	15000
Mg	мг/кг с.р.	700	700	1500	600	1300	1700
Na	мг/кг с.р.	500	500	-	-	200	1000
P	мг/кг с.р.	1000	1000	4000	700	1700	3000
Si	мг/кг с.р.	10000	1000			12000	15000
As	мг/кг с.р.	<0,1	<0,1	<0,1	0,2	0,1	0,1
Cd	мг/кг с.р.	0,1	0,1	0,05	0,1	0,04	0,2
Cr	мг/кг с.р.	10	10	0,5	1	-	1
Cu	мг/кг с.р.	2	2	4	2	-	5
Hg	мг/кг с.р.	0,02	0,02	<0,02	0,03	0,03	<0,02
Ni	мг/кг с.р.	1	1	1	2	-	2
Pb	мг/кг с.р.	0,5	2	0,1	2	1	1
V	мг/кг с.р.	3	-	-	< 1	-	3
Zn	мг/кг с.р.	10	10	30	10	-	25
Cl	% до м.с.б.р.	0,4	0,5	0,1	0,2	0,6	0,8
S		0,1	0,3	0,1	0,2	0,2	0,2

В таблиці позначено:

до м.с.р. – до маси сухих речовин; /кг с.р. – на кг сухих речовин; до м.с.б.р. – до маси сухої беззольної речовини

Характерні температури стадій деформування золи твердого біопалива



- ❖ **Температура початку деформації (IT)** - температура, при якій кінці зразка показують перші ознаки округлення через плавлення.
- ❖ **Температура розм'якшення (ST)** – температура, при якій висота зразка дорівнює його ширині.
- ❖ **Температура утворення напівсфери (HT)** – температура, при якій випробуваний зразок розплавиться досить, щоб сформувати напівсферу.
- ❖ **Температура розтікання (FT)** – температура, при якій випробуваний зразок повністю втратив свою форму, тобто остаточно розплавився та розтікся по поверхні.

Граничний вміст хімічних елементів як індикатор можливих проблем з обладнанням

Елемент	Гранична концентрація в паливі, % до м.с.р.	Лімітуючий фактор	Види палива, в яких часто перевищена гранична концентрація	Технологічні заходи для зменшення негативного впливу
N	<0,6	викиди NO _x	Солома, зернові, трава, відходи оливок	Первинні заходи (ступінчаста подача повітря, зонування процесу спалювання)
	<2,5	викиди NO _x	вторинна деревина, відходи МДФ	Каталітичні методи очищення
Cl	<0,1	корозія	Солома, зернові, трава, вторинна деревина, відходи оливок	вилуговування палива, автоматичне очищення теплообмінних поверхонь, спеціальні покриття труб, відповідний підбір матеріалів
	<0,1	викиди HCl	Солома, зернові, трава, вторинна деревина	суха сорбція, скрубери, вилуговування палива
	<0,3	викиди діоксинів та фуранів	Солома, зернові, вторинна деревина	сорбція активованим вугіллям
S	<0,1	корозія	Солома, зернові, трава, відходи оливок	див. «хлорна корозія»
	<0,2	викиди SO ₂	Трава, сіно, вторинна деревина	див. викиди Cl/HCl
K	< 7,0	точка плавлення золи, відкладення, корозія	Солома, зернові, трава, відходи оливок	антикорозійні заходи-див. «хлорна корозія»
		викиди твердих часток	Солома, зернові, трава, відходи оливок	Ефективне пиловловлювання, вилуговування палив

Методи запобігання проблемам при спалюванні біомаси

1. Попередній аналіз палива з метою визначення можливих проблем при його використанні.

- ❖ співвідношення $(Si+P+K)/(Ca+Mg+Al)$
- ❖ співвідношення $(K+Na)/(X[2S+Cl])$
- ❖ співвідношення $(2S/Cl)$

2. Попередня підготовка палива:

- ❖ вилуговування з соломи небажаних хімічних елементів атмосферними опадами (зберігання в полі);
- ❖ додавання речовин, що змінюють співвідношення мікроелементів в паливі та підвищують температуру плавлення золи (наприклад, вапно, каолін, доломіт, тальк)
- ❖ змішування з паливами, зола яких має вищу температуру плавлення в пропорції, яка не викликає проблем при спалюванні суміші

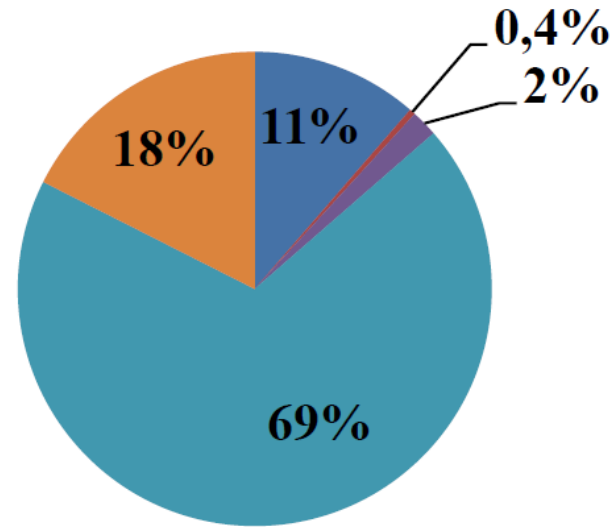
3. Модифікація процесу спалювання.

- ❖ водяне або повітряне охолодження решітки, рециркуляція димових газів, з метою зниження температури на поверхні решітки. Як правило, ці заходи спрямовані на підтримання температури меншої за $700\text{ }^{\circ}\text{C}$
- ❖ спалювання на обертальних елементах, обертальні пальники

4. Додаткові заходи:

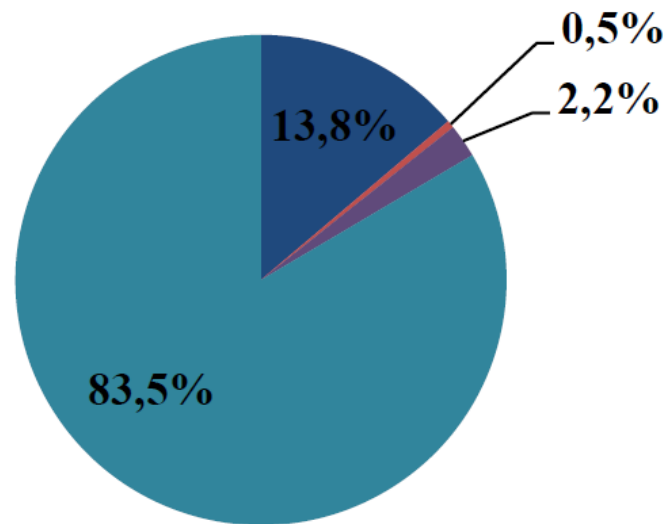
- ❖ встановлення екранів перед пароперегрівачем, полегшення їх заміни, спеціальні покриття та матеріали
- ❖ організація перегріву пари в іншому котлі, що використовує паливо, яке не викликає відкладень
- ❖ обмеження температури перегрітої пари діапазоном $420\text{-}480\text{ }^{\circ}\text{C}$
- ❖ автоматичне підтримання необхідного температурного режиму в топці, автоматичне чищення теплообмінних поверхонь
- ❖ застосування більш потужних систем золовидалення
- ❖ застосування спеціальних механічних розпушувачів золи, що заважають її спіканню
- ❖ застосування більш потужних систем очищення димових газів від летючої золи

Енергетичний аналіз котла



- з відхідними газами (q_2);
- від хімічної неповноти горіння (q_3);
- від зовнішнього охолодження (q_5);
- ККД

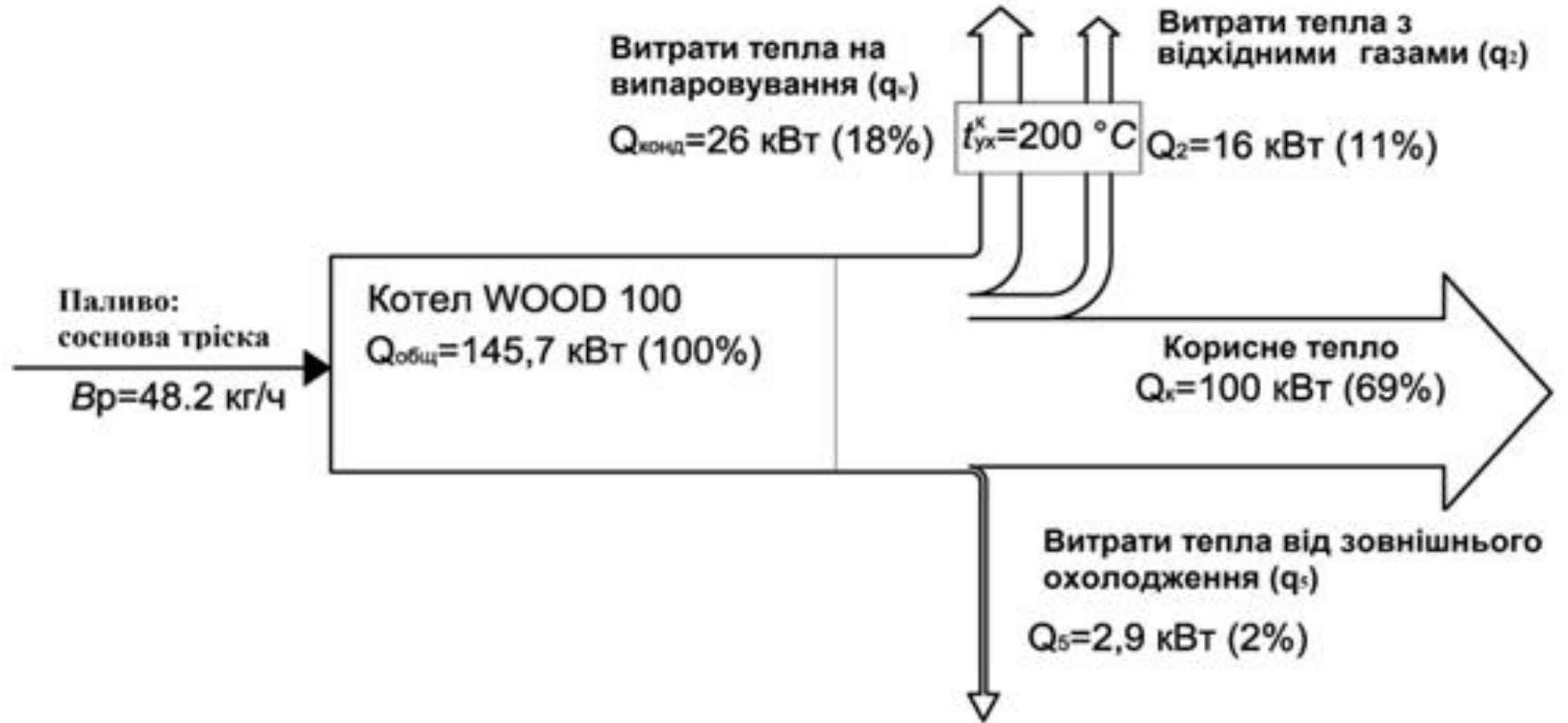
Тепловий баланс опалювального котла у перерахунку на вищу теплотворну здатність палива



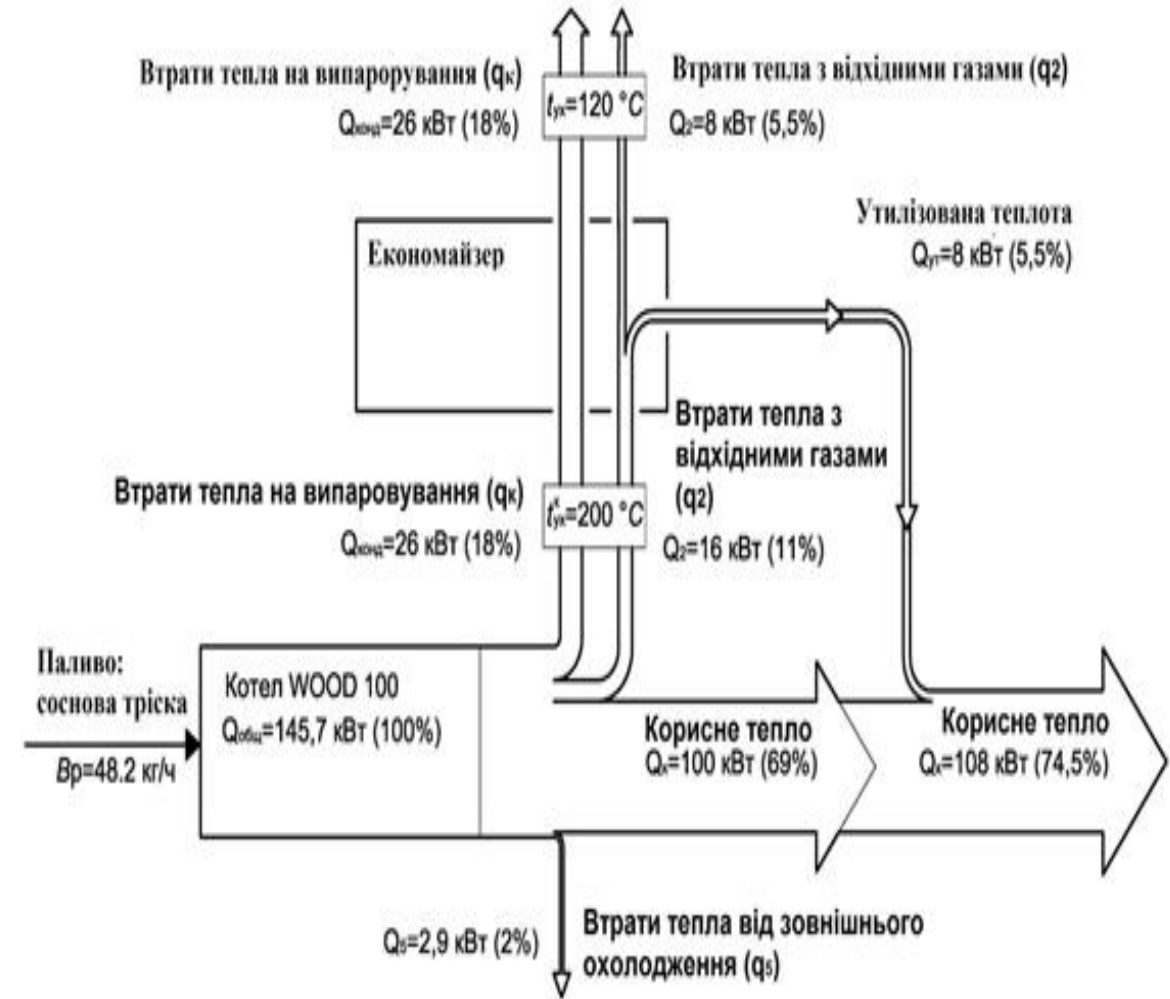
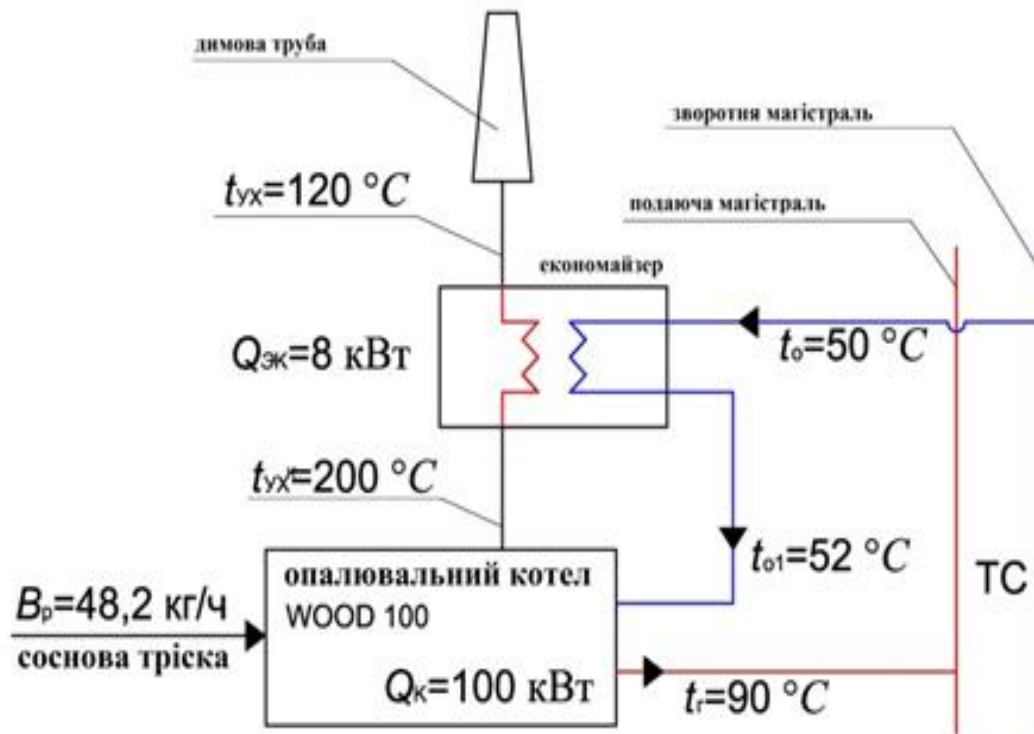
- з відхідними газами (q_2);
- від хімічної неповноти горіння (q_3);
- від зовнішнього охолодження (q_5);
- ККД

Реальний тепловий баланс опалювального котла

Розподіл теплової потужності котла по складовим теплового балансу

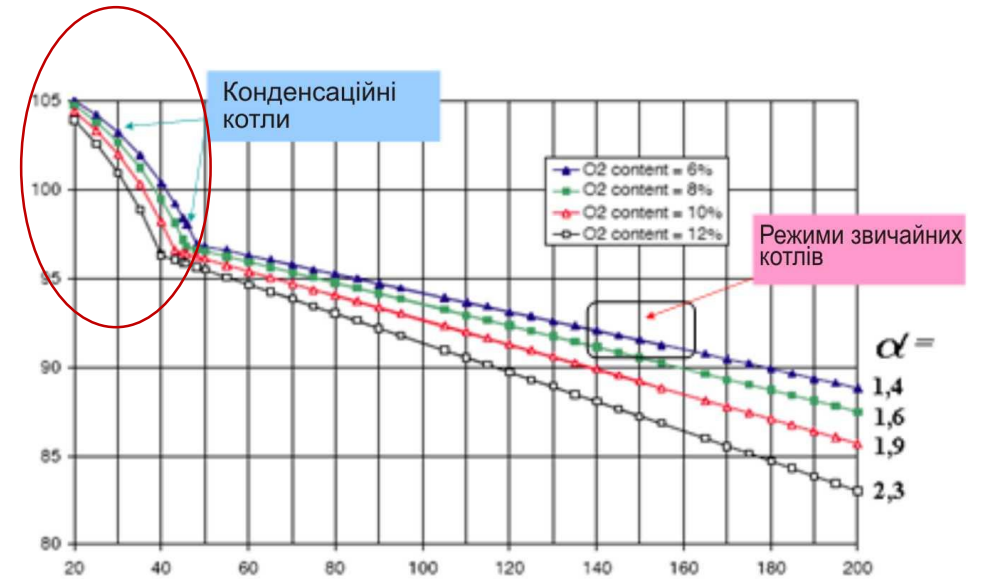
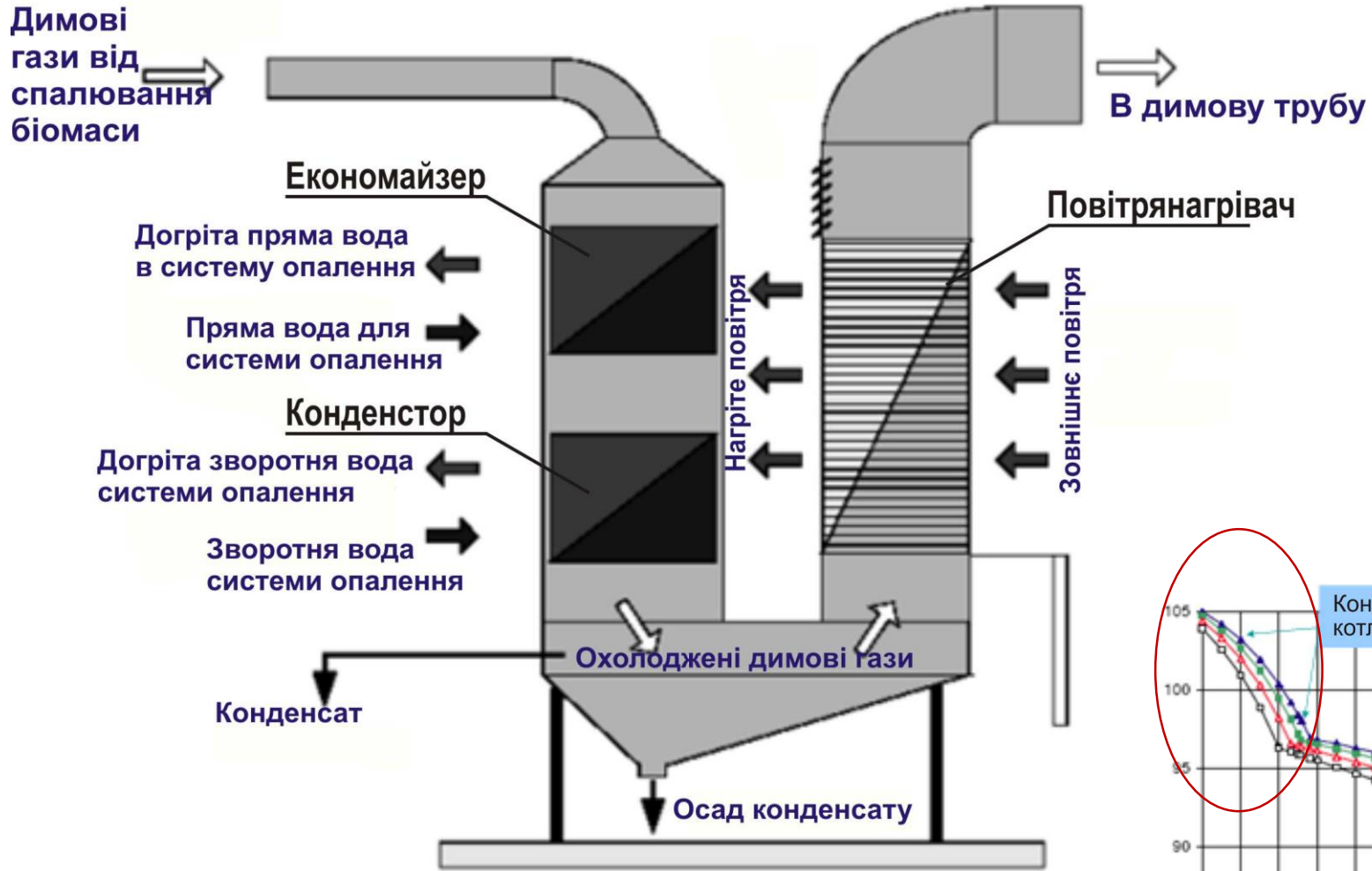


Розподіл теплової потужності котла надбудованого економайзером

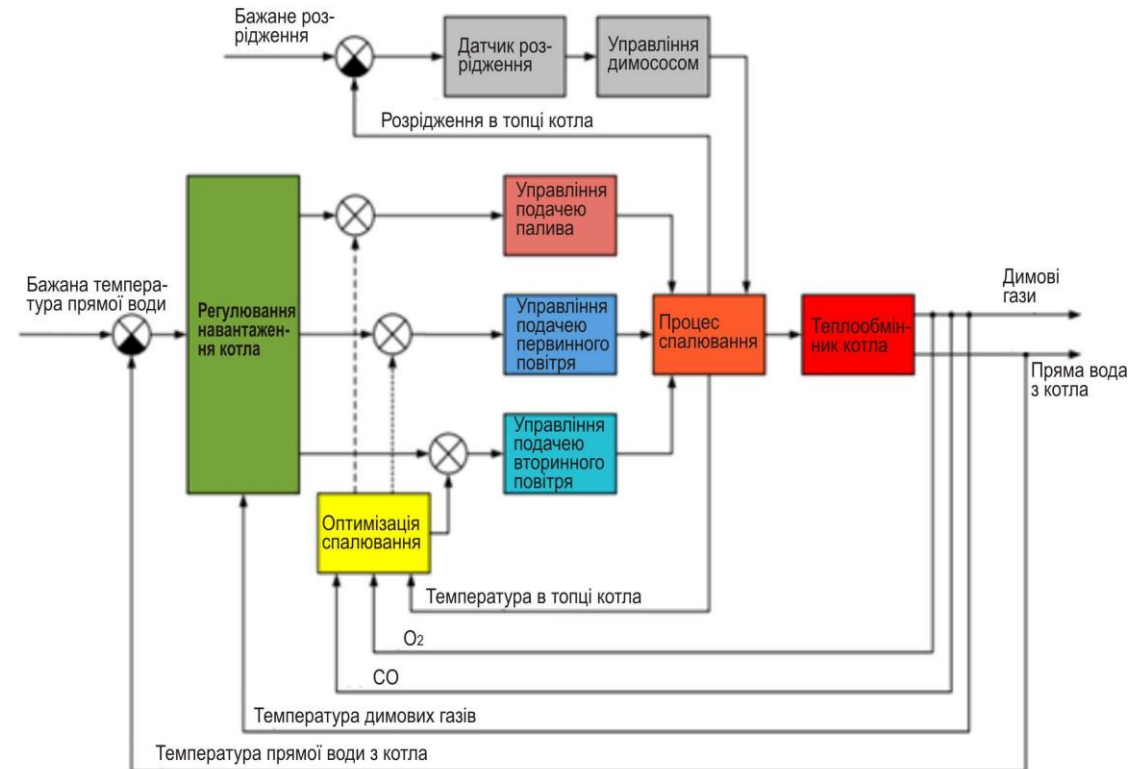
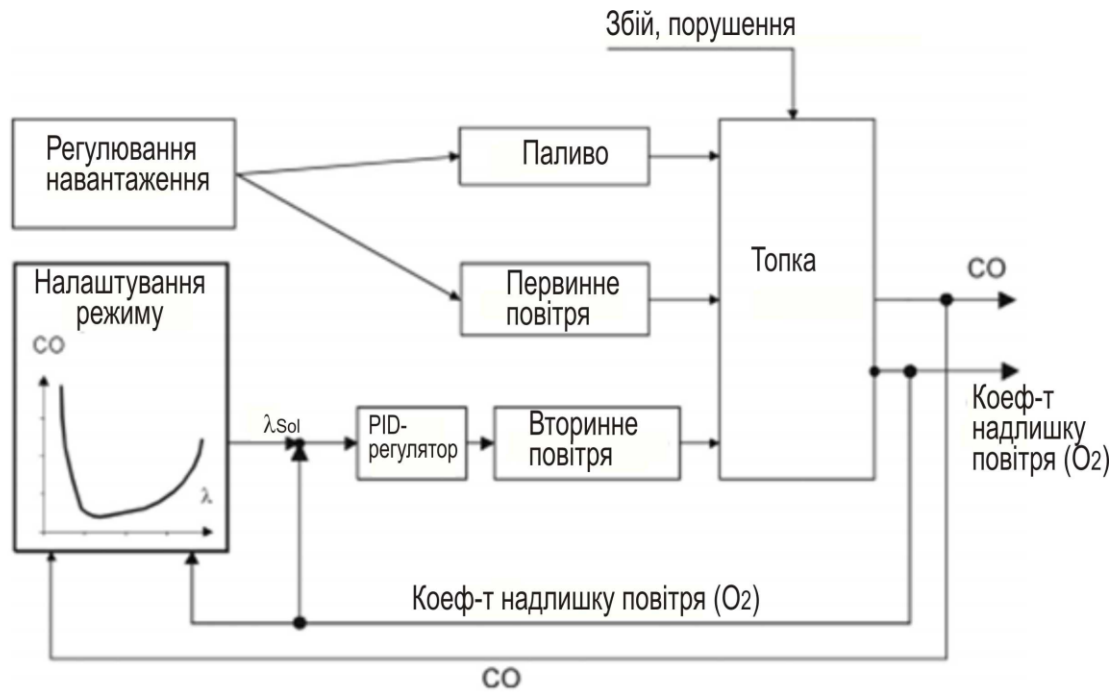
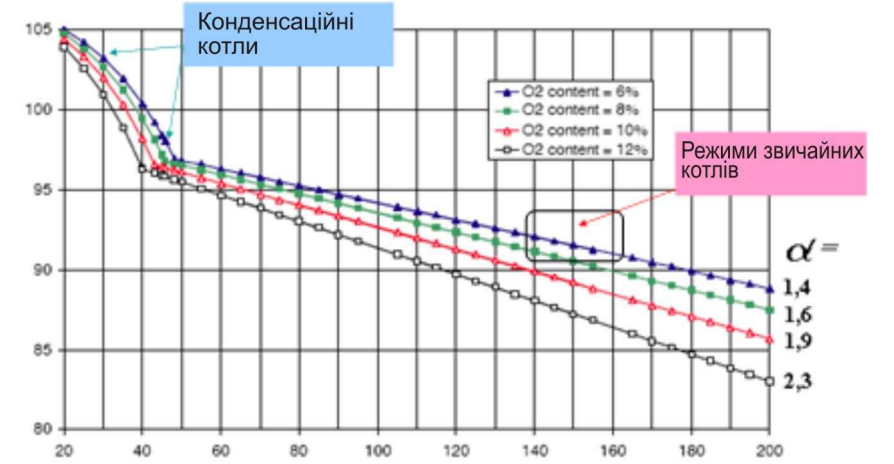
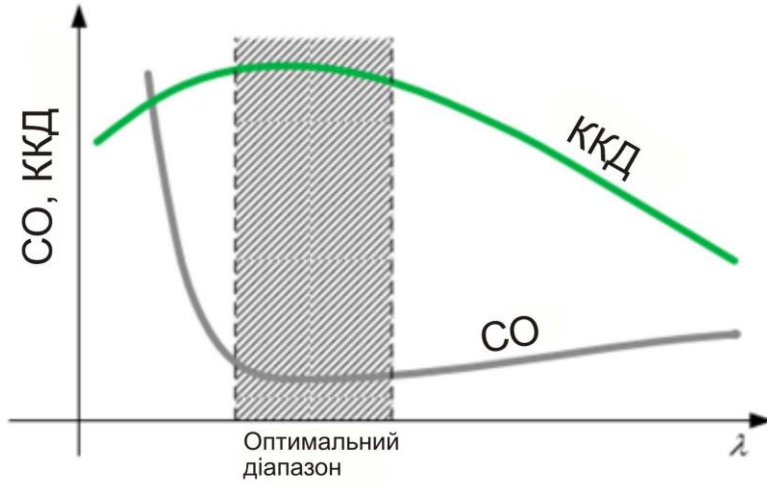


Умовна схема приєднання економайзера

Утилізація високотемпературної теплоти димових газів



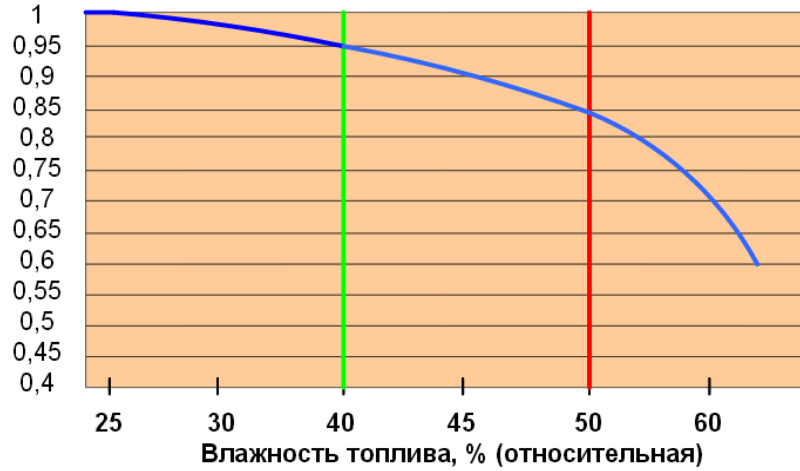
Енергетична ефективність та регулювання котлів на біомасі



Вплив зміни вологості палива на ККД та потужність

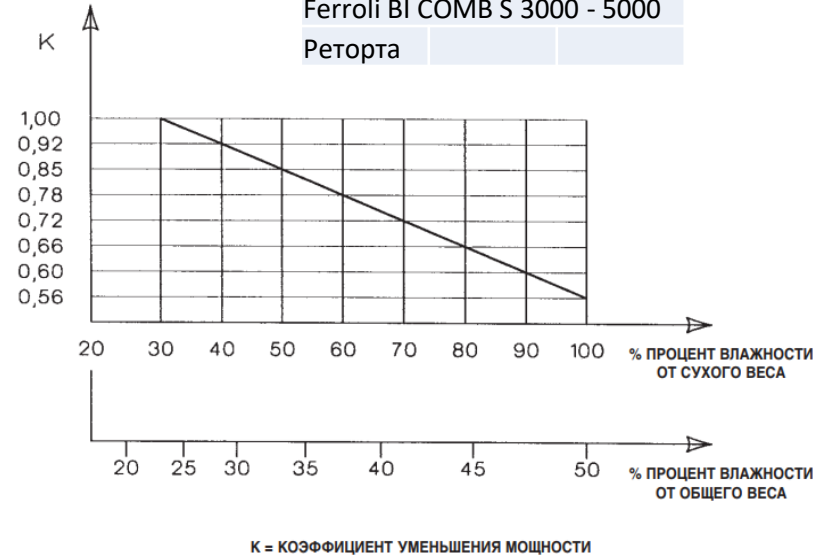
Колві, ручна подача

Коефіцієнт зниження КПД от влажности топлива



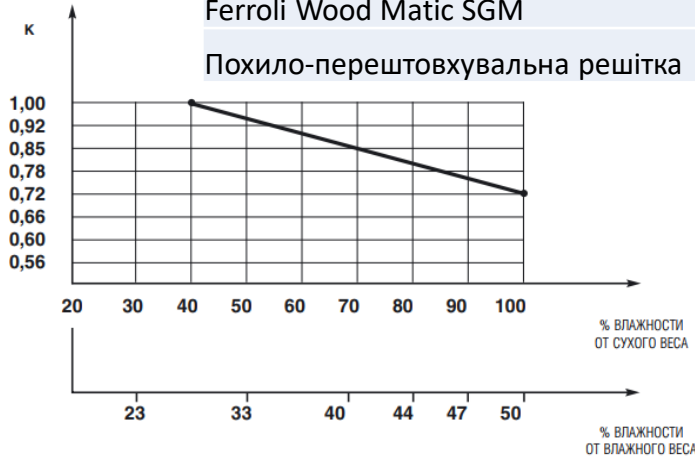
Ferrolі VI COMB S 3000 - 5000

Реторта



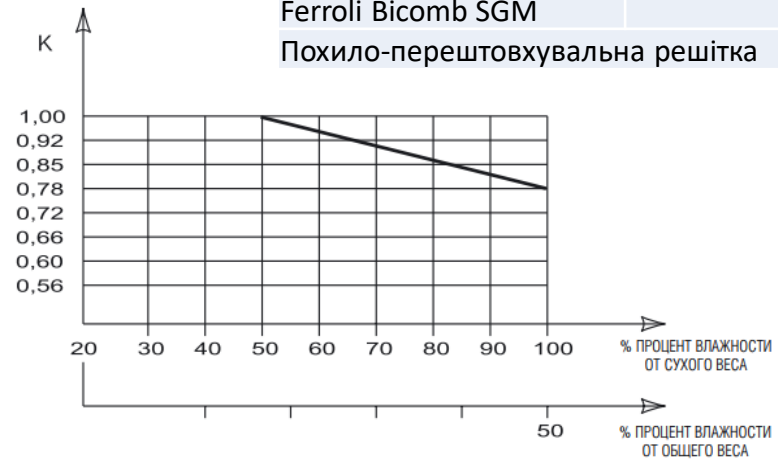
Ferrolі Wood Matic SGM

Похило-перештовхувальна решітка



Ferrolі Bicomb SGM

Похило-перештовхувальна решітка



Підсумок- найважливіші змінні при спалюванні біомаси

- ❖ **Механізми теплообміну:** мінімізувати втрати тепла з камери згоряння, організувати високий теплообмін по тракту димових газів. Щоб мати можливість керувати теплообміном, необхідно застосувати активні системи керування процесом за допомогою змінних керування процесом, наприклад кількості води, що протікає через котел
- ❖ **Зберігання тепла (теплова інерція)-** позитивне для важких печей. Але вищі викиди від недопалу під час пуску.
- ❖ **Попереднє нагрівання повітря:** повернення в камеру повітря, нагрітого димовими газами, що вийшли з камери згоряння – підвищення температури в камері згоряння
- ❖ **Коефіцієнт надлишку повітря:** вплив на ККД, викиди та втрати від неповноти згоряння. Має бути налаштований оптимально
- ❖ **Тип палива:** склад палива, вміст летких речовин/вуглецю, тепла поведінка, щільність, пористість, розмір та площа активної поверхні. Склад палива має важливе значення для теплотворної здатності та викидів, а також проблем, пов'язаних із золою.
- ❖ **Вміст вологи:** вплив на теплотворну здатність, підвищені викиди на початку роботи котла
- ❖ **Температура горіння:** має експоненціальний вплив на швидкість протікання реакцій
- ❖ **Конструкція:** конструкція системи згоряння суттєво впливає на процес згоряння через конструкцію та принцип роботи камери згоряння, через вибір матеріалів і через можливості керування процесом. Використовувані матеріали, в основному їх теплоємність, щільність, товщина, ізоляційний ефект і властивості поверхні, впливають на температуру камери згоряння
- ❖ **Ступенева подача повітря:** можливе одночасне скорочення як викидів від неповного згоряння, так і викидів NOx за рахунок розділення видалення летких речовин і згоряння в газовій фазі
- ❖ **Розподіл повітря:** Розподіл первинного та вторинного повітря в камері згоряння та зоні допалювання впливає на якість змішування повітря та палива, а отже, на час перебування, а згодом і на температуру горіння, необхідну для повного згоряння.
- ❖ **Подача палива:** безперервна чи порційна
- ❖ **Розподіл палива:** розподіл палива всередині камери згоряння, зменшуючи або збільшуючи площу активної поверхні, впливатиме на процес згоряння шляхом зменшення або збільшення реактивності палива
- ❖ **Розподіл тепла:** тісно пов'язаний з теплообміном і розподілом палива, і на додаток до кількох інших змінних впливає на температуру камери згоряння в різних секціях камери та передачу тепла після камери згоряння
- ❖ **Регулювання:** застосовуючи ефективне керування процесом згоряння, рівні викидів можна мінімізувати, а теплову ефективність -оптимізувати

1. *Jenkins, Bryan & Baxter, Larry & Koppejan, Jaap. (2011). Biomass Combustion. 10.1002/9781119990840.ch2.*
2. *Nazari, Laleh & Xu, Chunbao & Ray, Madhumita. (2021). Advanced and Emerging Technologies for Resource Recovery from Wastes. 10.1007/978-981-15-9267-6.*
3. *Thomas Nussbaumer. Combustion and Co-combustion of Biomass: Fundamentals, Technologies, and Primary Measures for Emission Reduction. Energy & Fuels 2003 17 (6), 1510-1521 DOI: 10.1021/ef030031q.*
4. *M. Kaltschmitt, H. Hartmann, H. Hofbauer (Hrsg.), Energie aus Biomasse, DOI 10.1007/978-3-662-47438-9_11.*
5. *Kavalov B, Peteves S. Bioheat Applications in the European Union. An Analysis and Perspective for 2010. EUR 21401 EN. OPOCE; 2004. JRC2911.*
6. *John Vos. Biomass Energy for Heating and Hot Water Supply in Belarus. Best Practice Guidelines. Part A: Biomass Combustion. UNDP/GEF.*
7. *Obernberger, I 2010. The present state and future development of industrial biomass combustion for heat and power generation (keynote lecture). in Proc. of the ASME-AIT-UIT 2010 Conference on Thermal and Environmental Issues in Energy Systems. ., Pisa, pp. 9-25, ASME-AIT-UIT 2010 Conference on Thermal and Environmental Issues in Energy Systems, Sorrento, Italy, 16/05/10.*
8. *Tariq, A.S., Reupke, P. and Sarwar, G. (1994) Biomass combustion systems. A guide for monitoring and efficient operation. Biomass Combustion Systems (2). Natural Resources Institute, Chatham, UK. ISBN 0-85954-385-4.*
9. *Torben Skøtt, BioPress. Производство энергии из соломы. Положение, технологии и инновации в Дании/ Agro Business Park A/S, Niels Pedersens Allé 2, 8830 Tjele, www.agropark.dk.*
10. *Koppejan, J., & van Loo, S. (Eds.). (2007). The Handbook of Biomass Combustion and Co-firing (1st ed.). Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781849773041>*
11. «Кращі з доступних технологій для житлово-комунального господарства України». Керівництво з відбору технологій/Під редакцією С. Єрмілова. – К.: «Поліграф плюс», 2016. – 134 с.: іл.

12. Виробництво енергії з біомаси в Україні: технології, розвиток, перспективи / Ін-т технічної теплофізики НАН України; за ред. Г. Гелетути. — Київ: Академ періодика, 2022. — 373 с.
13. Biomass Combustion Science, Technology and Engineering ([edition unavailable]). Elsevier Science. Retrieved from <https://www.perlego.com/book/1832789/biomass-combustion-science-technology-and-engineering-pdf> (Original work published 2013)
14. *Yin, Chungen & Li, Shuangshuang.* (2017). Advancing grate-firing for greater environmental impacts and efficiency for decentralized biomass/wastes combustion. *Energy Procedia.* 120. 373-379. 10.1016/j.egypro.2017.07.220.
15. *Mižáková, J.; Pitel, J.; Hošovský, A.; Pavlenko, I.; Ochowiak, M.; Khovanskyi, S.* Biomass Combustion Control in Small and Medium-Scale Boilers Based on Low Cost Sensing the Trend of Carbon Monoxide Emissions. *Processes* 2021, 9, 2030. <https://doi.org/10.3390/pr9112030>.
16. *Hupa, Mikko & Karlström, Oskar & Vainio, Emil.* (2015). Biomass combustion technology development - It is all about chemical details. *Proc Combust Inst.* 36. 10.1016/j.proci.2016.06.152.
17. *Fouad Al-Mansour, Jaroslaw Zuwala,* An evaluation of biomass co-firing in Europe, *Biomass and Bioenergy*, Volume 34, Issue 5, 2010, Pages 620-629, ISSN 0961-9534, <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2010.01.004>.
18. *Гелетути Г., Крамар В., Епик О., Антощук Т., Тімков В.* Комплексний аналіз українського ринку пелет з біомаси/Comprehensive analysis of the Ukrainian biomass pellets market. Програма розвитку Організації Об'єднаних Націй, 2016.
https://uabio.org/wp-content/uploads/2016/11/kompleksnii_analiz_ukrayinskogo_rinku_pelet_z_biomasi.pdf
19. *Van Loo, S. and J. Koppejan,* The Handbook of Biomass Combustion and Co-firing. 2008: Earthscan.
20. Christer Heen Skotland. Measurement of temperature conditions in grate zone of a 1 MW wood-pellets boiler fired with high ash content wood-pellets.// Norwegian University of Science and Technology. Trondheim, 2009.



European Bank
for Reconstruction and Development



IBBK
BIOGAS

Програма управління знаннями для розвитку сталої біоенергетики

Дякую за увагу!

Володимир Крамар, к.т.н.,
НТЦ «Біомаса»,
Біоенергетична
асоціація України (UABIO)

<https://uabio.org>

<https://www.facebook.com/uabio>

