

## НОВІТНІ ТЕХНОЛОГІЇ ВИКОРИСТАННЯ ВУГІЛЛЯ В ЕНЕРГЕТИЦІ

Ю. П. Корчевой<sup>1</sup>, Г. Г. Півняк<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Інститут вугільних енерготехнологій НАНУ та Міністерства палива і енергетики України, Київ

<sup>2</sup>Національний гірничий університет Міністерства науки і освіти України, Дніпропетровськ

Надійшла до редакції 29.12.05

---

**Резюме:** Розглянуто сучасний стан енергетичного обладнання українських вугільних ТЕС та паливної бази енергетики. Наведені паливні складові виробітку електроенергії електростанціями. Визначено шляхи скорочення витрат використовуваного в енергетиці газу, що йде на підтримку горіння у вугільних котлоагрегатах. Це досягається за рахунок модернізації та реконструкції існуючого обладнання, а також впровадження нових високоефективних, екологічно чистих технологій спалювання вугілля. Розглянуто технології попередньої термічної підготовки вугілля, спалювання в "арочних" топках, котлоагрегатах атмосферного циркулюючого киплячого шару (ЦКШ), парогазових установках з внутрішньоцикловою газифікацією і спалюванням вугілля. Наведені приклади впровадження деяких з цих технологій на ТЕС України та дані щодо розширення паливної бази енергетики за рахунок залучення до енергетичного балансу бурого і "солоного" вугілля, а також відходів вуглезабагачення – шламів та мулів.

**Ключові слова:** чиста вугільна енергетика, циркулюючий киплячий шар, ресурсна база.

**Ю. П. Корчевой, Г. Г. Пивняк. НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ УГЛЯ В ЭНЕРГЕТИКЕ.**

**Резюме:** Рассмотрено современное состояние энергетического оборудования украинских угольных ТЭС и топливной базы энергетики. Приведены топливные составляющие выработки электроэнергии электростанциями. Определены пути сокращения расхода используемого в энергетике газа, что идет на поддержание процесса горения в угольных котлоагрегатах. Это достигается за счет модернизации и реконструкции существующего оборудования, а также внедрения новых высокоэффективных, экологически чистых технологий сжигания угля. Рассмотрены технологии предварительной термической подготовки угля, сжигание в "арочных" топках, в топках атмосферного циркулирующего кипящего слоя (ЦКС), парогазовых установках с внутрицикловой газификацией и сжиганием угля. Приведены примеры внедрения некоторых технологий на ТЭС Украины и данные по расширению топливной базы энергетики за счет вовлечения в энергетический баланс бурого и "соленого" угля, а также отходов углеобогащения – шламов и илов.

**Ключевые слова:** чистая угольная энергетика, циркулирующий кипящий слой, ресурсная база.

**Yu. Korchevoy, G. Pivnyak. ADVANCED COAL TECHNOLOGY FOR ENERGY BRANCH.**

**Abstract:** The current conditions of the Ukrainian coal thermal power plants along with the fuel bases of the Power sector have been analyzed. The fuel components of the electric energy produced by the power plants were presented. It was emphasized that big part of the total natural gas consumption in the power sector has been spent on maintaining low reactive coal combustion in coal fed boiler furnaces. It is achieved due to the implementation of new highly efficient, clean ecological technologies of coal combustion. The technologies of the preliminary thermal coal preparation, coal firing in the "arch fire" furnaces, in the atmospheric circulating fluidized bed, steam-gas units with inter cyclical coal gasification and combustion have been analyzed in details. A set of examples of these technologies utilization at the Ukrainian power plants has been presented along with the data on the widening of the Power sector fuel bases by means of the engaging of new sources into the fuel balance, such as: brown and "salt" coal and the residues of coal enrichment: schlamm and silt.

**Keywords:** clean coal technology, circulated fluidized bed, mining resources.

Електроенергетика є однією з найважливіших галузей господарства, основою економіки України. Загальна потужність електростанцій, що працюють на Єдину енергетичну систему України, складає 55,1 млн кВт.

У 2004 р. виробіток електроенергії електростанціями Мінпаливенерго досяг майже 181 млрд кВт·год, із яких одержано (табл. 1):

- на атомних електростанціях – 48 %;
- на теплових електростанціях – 45,5 %;
- на гідроелектростанціях – 6,5 %;
- на нетрадиційних джерелах – 0,005 %.

**Таблиця 1. Структура виробництва електроенергії об'єднаною енергетичною системою України (млрд кВт·год)**

Тип станцій	Роки		
	1991	2000	2004
ТЕС	182,5 (65,9 %)	76,34 (44,7 %)	73,34 (40,5 %)
АЕС	75,13 (27,2 %)	77,34 (45,3 %)	87,02 (48 %)
ГЕС	11,90 (4,3 %)	11,38 (6,7 %)	11,75 (6,5 %)
Блок-станції та комунальні ТЕЦ	7,24 (2,6 %)	5,67 (3,3 %)	9,20 (5,0 %)

**Примітка.** Виробництво електроенергії вітровими двигунами у 2004 р. – 7,7 млн кВт·год.

Як видно, у забезпеченні України електроенергією провідну роль відіграє атомна енергетика. При цьому треба враховувати, що атомні електростанції працюють у базовому режимі і тому успішно функціонувати можуть тільки у гнучкій комбінації з маневреними типами генерації електроенергії.

Найбільшу маневреність мають гідроелектростанції. Але їхня частка у виробітку електроенергії, як уже зазначалося, становила усього 6,5 %. Через обмеженість гідроресурсів України кількість гідроелектростанцій не може бути істотно збільшена.

Розглянемо сучасні проблемні питання роботи теплових електростанцій, що працюють на вугіллі і природному газі (табл. 2). У 2004 р. з 9,6 млрд м<sup>3</sup> газу, що витратила енергетична галузь, майже 4 млрд м<sup>3</sup> пішло на горіння спільно з вугіллям у факельних вугільних котлах. Взагалі слід підкреслити, що за останнє десятиліття динаміка зміни структури генеруючих потужностей характеризується стійкими показниками для атомної енергетики, незначним зниженням генерації на вугільних енергоблоках та прискореним падінням – на газових. Уже нині можна передбачити, що природний газ як енергоносіє не відіграватиме істотної ролі у стратегічному розвитку енергетики України. Його використання обмежиться комунальною та част-

## Проблеми розвитку енергетики України

Таблиця 2. Структура енергоресурсів у виробництві електричної енергії і тепла тепловими електростанціями України

Енергоносії	Одиниця виміру	Роки				
		1991	1997	2000	2003	2004
Вугілля	млн т	37,9	29,9	26,5	27,9	25,5
	млн т у. п.	22,7	18,0	15,5	20,0	18,5
	%	31,3	52,3	52,4	63,9	62,3
Мазут	млн т	11,0	1,3	0,2	0,2	0,07
	млн т у. п.	15,1	1,8	0,3	0,3	0,1
	%	20,8	5,2	0,9	1,0	0,3
Природний газ	млрд м <sup>3</sup>	30,2	12,8	12,1	9,7	9,6
	млн т у. п.	34,7	14,6	13,7	11,0	11,1
	%	47,9	42,5	46,7	35,1	37,4
Разом:	млн т у. п.	72,5	34,4	29,5	31,3	29,7

Примітка: у. п. – умовне паливо

ково промисловою сферами. Так само в енергетиці в свій час скоротилося використання мазуту (див. табл. 2). Таким чином, другим стратегічним енергоносієм для нашої держави є вугілля, розвіданих запасів якого вистачить на сотні років. На рис. 1 представлені загальні запаси енергетичного вугілля, а також ті, що знаходяться на балансі:

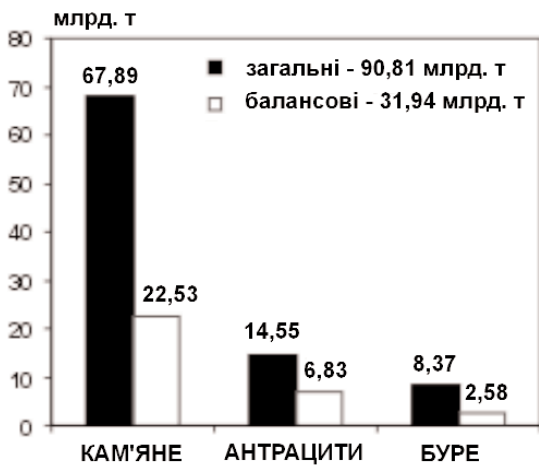


Рис. 1. Розвідані запаси енергетичного вугілля в Україні, млрд т

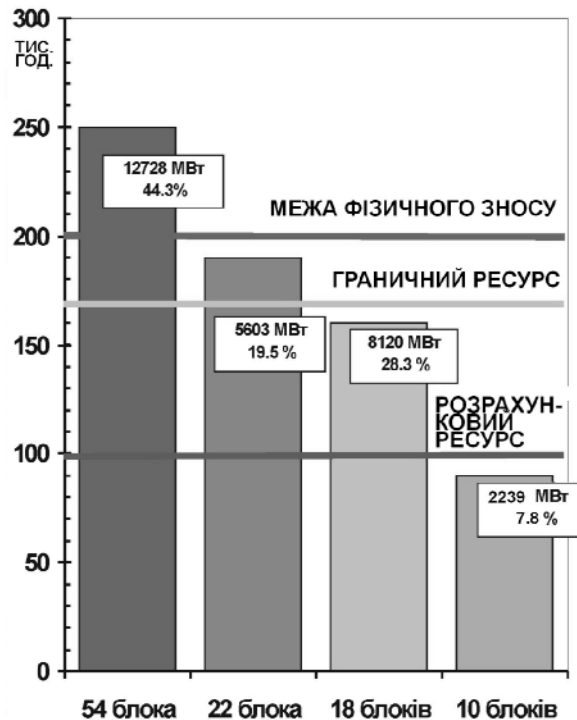


Рис. 2. Технічний стан енергоблоків Мінпаліенерго України по ресурсу роботи на 01.01.2005 р.

- в Донецькому басейні – 91,5 %;
- в Дніпровському басейні – 5,8 %;
- в Дніпровсько-Донецькій западині – 1,22 %.

Як видно з табл. 2, вугільні станції України споживають велику частину газу для горіння. Це пов'язано з тим що (рис. 2):

- 1) основу енергетики України складають 104 енергоблоки теплових електричних станцій, більшість з яких були побудовані у 1960–70 рр.; на пиловидному вугіллі працює 91 енергоблок. 90 % всіх енергоблоків морально і фізично застаріли та вже відпрацювали свій розрахунковий ресурс (100 000 год.); більше 70 % енергоблоків перевищили граничний (170 000 год.) ресурс роботи, а половина взагалі знаходиться за межею граничного зносу;
- 2) за останні 15 років на пиловугільні електростанції постачається вугілля із зольністю, що перевищує розрахункову, а це потребує спалювання значних додаткових об'ємів природного газу (до 30 % по теплу) для підтримки теплового навантаження топки; таке спільне спалювання призводить до збільшення недопалу вуглецю (до 30 %) та зниження коефіцієнту корисної дії (ККД) котлоагрегату;

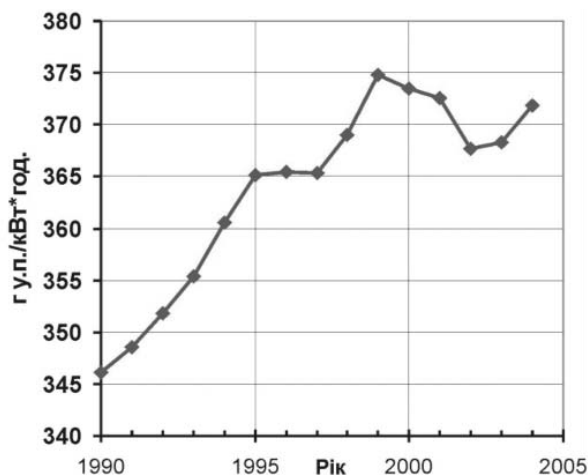


Рис. 3. Витрати умовного палива (у. п.) на відпуск електроенергії ТЕС Мінпаливенерго України

- 3) робота пиловугільних котлів ускладнюється тим, що вони працюють у маневрових, непередбачених проектом режимах, а це, у свою чергу, призводить до швидкого зносу обладнання, додаткових витрат газу, та, як наслідок, збільшення питомих витрат умовного палива на виробіток 1 кВт-год електроенергії (рис. 3).

Існує два шляхи вирішення цієї складної проблеми:

- подовження ресурсу роботи ТЕС за рахунок модернізації та реконструкції;
- впровадження високоефективних, екологічно чистих вугільних енерготехнологій.

### Подовження ресурсу роботи ТЕС

Для котлоагрегатів, що не виробили свій граничний ресурс, доцільно проведення маловитратної реконструкції з заміною систем паложивлення, встановлення газощільних екранів, пальників (в Інституті вугільних енерготехнологій НАН України розроблені пальни-

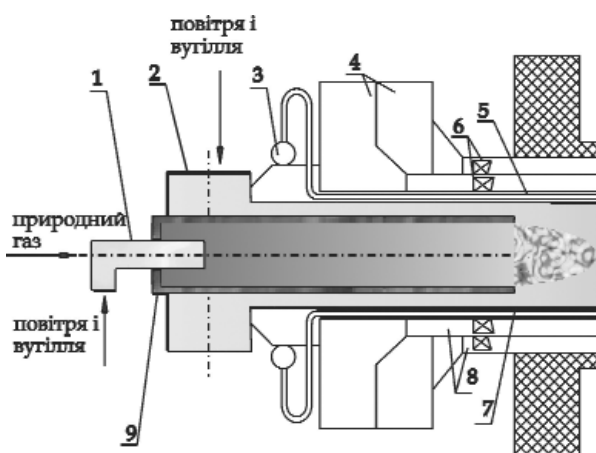


Рис. 4. Пальник з термохімічною підготовкою палива для факельних котлоагрегатів, що спалюють антрацит: 1 – змінний равлик центрального повітря; 2 – равлик пиловугільної суміші; 3, 5 – існуючі газові магістралі; 4, 6 – підводи і завихрювачі вторинного повітря; 7 – канал вторинного вугілля; 8 – канали вторинного повітря; 9 – муфель

ки з термохімічною підготовкою високозольного антрациту (рис. 4)) або передтопок-запалювачів фонтануючого шару і т. ін.

Використання такого модернізованого пальникового пристрою, як *пальники з термохімічною підготовкою (ТХП) вугілля* для спалювання високозольного антрациту не призводить до значних змін у транспортних магістралях та конструктивному виконанні котлоагрегату. Технологія ТХП високозольного антрациту передбачає швидкісне нагрівання твердого палива високотемпературним, хімічно активним теплоносієм (наприклад, продуктами згорання органічного палива). В результаті створюється високотемпературне двофазне паливо, що складається з летких, газоподібних продуктів газифікації та коксового залишку з властивостями, відмінними від властивостей первинного антрацитового

пилу. Така підготовка вугільного пилу дає можливість суттєво знизити витрати газу або мазуту на підсвічування факелу, зменшити втрати тепла з механічним недопалом та викиди оксидів азоту  $\text{NO}_x$  у довкілля.

Для більш масштабної реконструкції котлоагрегатів із зміною проектного палива на високозольне (до 30 %) можна рекомендувати реконструкцію топки на "арочну" з установкою плечових шлакових передтопок, як на котлі № 8 Зміївської ТЕС (рис. 5).

Реконструкція котлоагрегату ТПП-210А з установкою в нижній частині топки плечових шлакових передтопок виконана з метою збільшення часу перебування паливних часточок у топці, підвищення температури горіння і, як наслідок, зростання конверсії вугілля, а також повернення леткої золи на допалення в топку. Для реалізації цієї ідеї значно збільшено об'єм топки в її нижній частині, а пальники розміщено на існуючих плечах вертикально вниз. Плечові передтопки мають спеціальну конструкцію для зменшення витрат теплоти в зонах запалення і горіння та збільшення температури (до 1700–1800 °С) в них та нижній частині топки.

Котлоагрегат працює таким чином. Основна частина процесу спалювання (більше 90 % вигорання вугілля) відбувається у плечових передтопках. Тут також у вигляді шлаку виводиться біля 50 % золи. Зола з електрофільтрів частково повертається на процес її допалення в плечові передтопки, а частково по системі гідрозоловидалення виводиться у відвал. Цей котлоагрегат після реконструкції дає змогу спалювати антрацит зольністю до 30 % та регулювати навантаження у межах 70–100 % без підсвічування, тобто досягти ККД котлоагрегату до 87 %.

Але запровадження плечової топки не вирішує проблеми очищення вихідних газів від оксидів сірки та азоту і є лише модернізацією вже існуючого котлоагрегату. Зважаючи на це, Інститутом вугільних енерготехнологій при

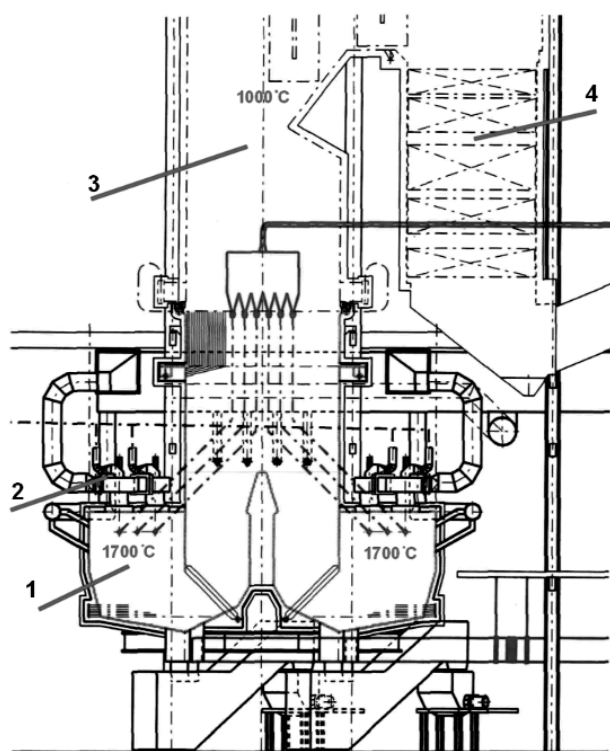


Рис. 5. Реконструкція енергоблоку № 8 Зміївської ТЕС з встановленням плечових передтопок

введенні в експлуатацію котла № 8 Змієвської ТЕС було здійснено:

- вибір оптимального складу палива з урахуванням реакційної здатності вугілля, температури плавкості золи та ін.,
- розробку рекомендацій щодо оптимізації процесу горіння в шлакових передтопках (визначення оптимальної температури горіння, відношення часток первинного та вторинного повітря, розрахунки необхідної температури підігріву первинного повітря, рівня помелу вугілля та ін.;
- розробку рекомендацій щодо створення сумішей пісного вугілля та антрацити перед їх подачею в котлоагрегат.

**Впровадження нових високоефективних, екологічно чистих технологій термічної переробки твердого палива**

Ці технології реалізуються при використанні:

- пилувугільних котлів на надкритичні параметри пари з системами сірко- та азотоочищення;

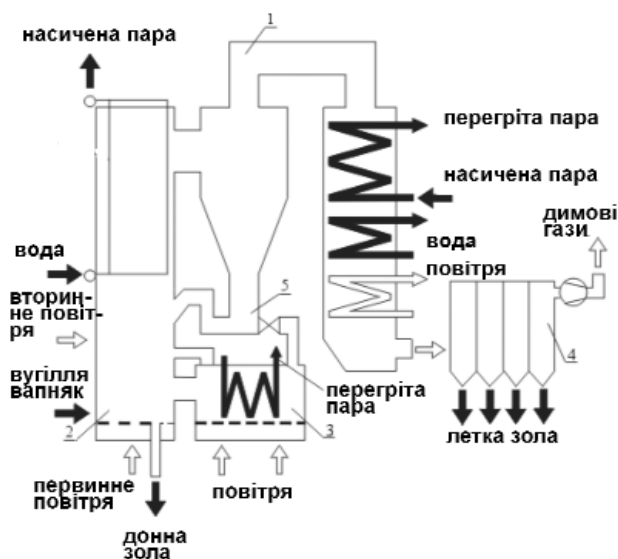


Рис. 6. Схема установки спалювання вугілля у циркулюючому киплячому шарі: 1 – циклон, 2 – топка, 3 – теплообмінник киплячого шару, 4 – електрофільтр, 5 – L-клапан

- котлів циркулюючого киплячого шару (ЦКШ), що працюють при атмосферному тиску, та котлів киплячого шару підвищеного тиску;
- парогазових установок з внутрішньоцикловою газифікацією вугілля в потоці та спалюванням в киплячому шарі під тиском.

Вагомий внесок у розробку та впровадження в українську теплоенергетику нових високоефективних екологічно чистих вугільних енерготехнологій протягом останніх двох десятиріч зробив Інститут вугільних енерготехнологій НАН України. В рамках фундаментальних науково-дослідних робіт, що виконані в Інституті, визначено основні зако-



Рис. 7. Енергоблок № 4 потужністю 210 МВт Старобешівської ТЕС з циркулюючим киплячим шаром: зліва – димар звичайного енергоблоку ТП-100 (значні викиди шкідливих газів та пилу); справа – димар ЦКШ-енергоблоку, що працює (викиди у межах європейських норм)



номірності, кінетичні та динамічні характеристики взаємодії вугілля та коксів різного ступеня метаморфізму багатьох регіонів світу з газами-реагентами в широкому діапазоні зміни зольності вугілля, температур реагування, концентрації та тиску газу-реагенту. На основі цих робіт створено методики розрахунку топок та реакторів для спалювання і газифікації вугілля в потоці та ЦКШ при атмосферному та підвищеному тисках, проведено адаптацію існуючих технологій киплячого шару для українського енергетичного вугілля, розроблено технології спалювання високозольного, високосірчистого вугілля та відходів вуглезбагачення в циркулюючому киплячому шарі, розроблено технології спалювання та газифікації енергетичного вугілля в киплячому шарі під тиском для парогазових установок на твердому паливі. Результати досліджень використані багатьма провідними зарубіжними фірмами, вони також впроваджені в першому українському енергетичному котлоагрегаті циркулюючого киплячого шару для енергоблоку № 4 Старобешівської ТЕС продуктивністю 670 т пари на годину та електричною потужністю 210 МВт (рис. 6 та 7).

Енергоблок № 4 Старобешівської ТЕС введено в експлуатацію в 1961 р. Напрацьований час на початок реконструкції (квітень 1997 р.) становив 232 000 годин. Встановлений новий ЦКШ-парогенератор розраховано на спалювання шламів з накопичувачів збагачувальних фабрик (зольність – біля 55 %, вологість – 22,5 %, вміст летких фракцій – 5 %).

Технологія ЦКШ дозволяє знизити викиди оксидів азоту  $\text{NO}_2$  до 200 мг/м<sup>3</sup> за рахунок низької температури в камері топки (850–900 °С) та концентрацію оксидів сірки до 200 мг/м<sup>3</sup> за рахунок зв'язування сірки вапняком. Котел оснащено новим електрофільтром, що дає можливість знизити викиди твердих часточок до європейських норм (< 50 мг/м<sup>3</sup>).

Особливість цього котла полягає в тому, що вугільні часточки спалюються з багатократною циркуляцією за рахунок встановлення виносного циклону. Слід зазначити, що при спалюванні в ЦКШ частка вуглецю в циркулюючому матеріалі досягає 3–5 %, регулювання – до 50–100 % від номінального навантаження без погіршення технологічних показників процесу.

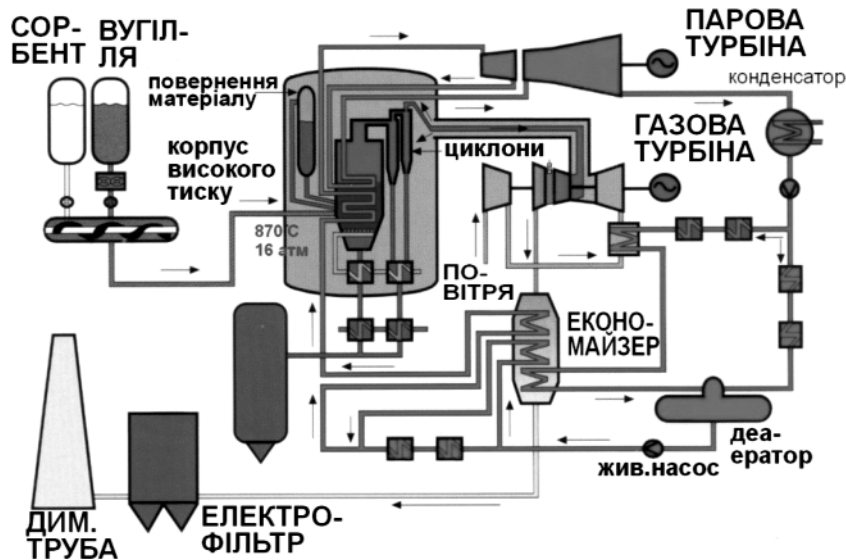


Рис. 8. Схема технології спалювання вугілля у киплячому шарі під тиском

Інститутом вугільних енерготехнологій були проведені такі роботи по реалізації технологій ЦКШ на Старобешівській ТЕС:

- адаптація технології до українського антрациту та його шламів (визначено оптимальну температуру горіння; відношення

первинного і вторинного повітря; співвідношення кальцій/сірка, що забезпечує зв'язування більш ніж 90 % оксидів сірки SO<sub>2</sub>; мінімальну температуру коксозольного залишку, що рециркулює; оптимальний розмір паливних часточок);

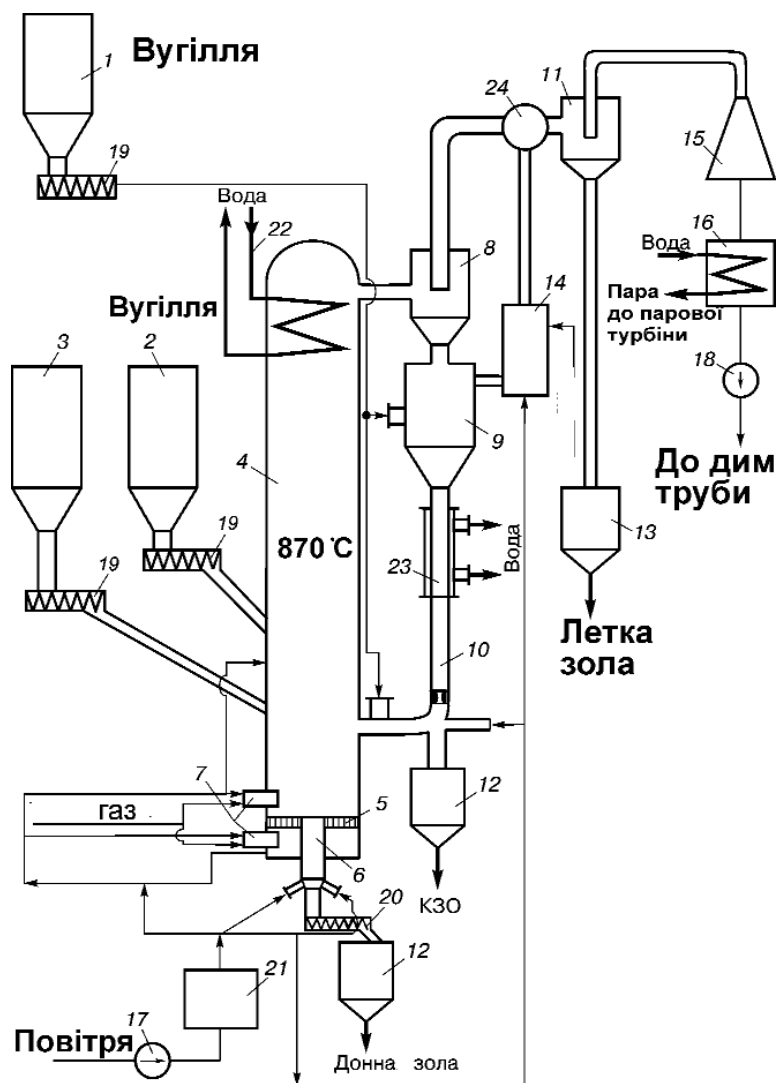


Рис. 9. Установа для спалювання (газифікації) вугілля у циркулюючому киплячому шарі під тиском (ЦКШ -1,0): 1, 2 – бункери вугілля, 3 – бункер золи, 4 – реактор, 5 – перфороване сито, 6 – допалювач донної золи, 7 – палиники, 8, 11 – циклони, 9 – піролізер, 10 – тракт повернення коксозольного залишку, 12, 13 – бункери донної та легкої золи, 14 – камера спалювання піролізного газу, 15 – приєднання до газової турбіни, 16, 22, 23 – теплообмінники, 17 – компресор, 18 – димосос, 19, 20 – шнек, 21 – підігрів дуття, 24 – змішувач



- визначення максимальної долі шламу, що подається до котлоагрегату, на рівні до 85 %;
- проведення розрахунків висоти топки ЦКШ, діаметру його циклонів та розробку рекомендацій по розміщенню теплообмінних поверхонь.

Виконано також технічну експертизу проєктів сушарок та ЦКШ-котлоагрегатів при проведенні тендеру на реалізацію проєкту.

Іншим прикладом високоефективної, екологічно чистої вугільної енерготехнології є технологія спалювання вугілля у киплячому шарі під тиском (КШТ) для парогазових установок на твердому паливі (рис. 8). Основні переваги запропонованої технології:

- можливість створення енергоблоку з високим ККД (42–44 %);
- малі габарити установки, що дає можливість установлювати КШТ-котлоагрегати в комірках старих блоків;
- низькі викиди оксидів сірки та азоту ( $< 200 \text{ мг/нм}^3$ );
- можливість використання палива з високим вмістом сірки та золи (до 50 %).

Максимальна потужність енергоблоків з КШТ-технологіями – 360 МВт.

Особливість процесу спалювання вугілля в КШТ полягає у використанні високого тиску повітря в котлоагрегаті (12–16 атм). Висота киплячого шару у топці досягає 3–4 м, швидкість потоку газу – 1 м/с, що зменшує ерозію поверхонь нагрівання, температура в топці – на рівні 850–870 °С.

З метою вдосконалення технології спалювання вугілля під тиском в Інституті вугільних енерготехнологій виготовлено робочий проєкт установки з циркулюючим киплячим шаром під тиском (ЦКШТ) 8–12 атм (рис. 9). Установка розрахована на витрати вугілля 2 т на годину та має теплову потужність 10 МВт. Ця установка передбачає відпрацювання різних режимів:

- спалювання в ЦКШТ;
- двостадійний режим термічної переробки піроліз-спалювання в ЦКШТ.

Технологія ЦКШТ є більш прогресивною, ніж традиційний класичний киплячий шар під тиском тому, що дає можливість спалювати з високою ефективністю таке низькореакційне високозольне вугілля, як антрацит за рахунок забезпечення необхідного часу перебування паливних часточок у реакційній зоні. Організація двостадійної термічної переробки (піро-

Таблиця 3. Прогнозні оцінки потужностей котлоагрегатів, які можуть бути споруджені для спалювання відходів вуглезабагачення, бурого та “солоного” вугілля

Вид палива	Загальні запаси, млн т	Придатні запаси або перезбагачене паливо, млн т	Теплота згоряння, ккал/кг	Обсяг використання, млн т у. п./рік	Загальна потужність енергоблоків, МВт	Кількість енергоблоків (200 МВт)
Буре вугілля	8 370	2 580	1 800–2 200	2,5–3,0	1 100–1 300	6–7
Шлами	130–155	35–45	4 500–5 200	1,0–1,5	400–600	6–7
Сухі відходи	600–650	73–80	4 200–5 000	2,7–3,3	1 200–1 500	6–8
“Солоне” вугілля	10 000	>5 000	5 600–6 300	2,7–3,3	1 200–1 500	6–8

ліз-спалювання) дозволяє підвищити температуру продуктів горіння на вході в газову турбіну до 1200–1400 °С за рахунок спалювання продуктів піролізу в камері згоряння газової турбіни і завдяки цьому підвищити ККД енергоустановки до 44–46 %.

Серед технологій газифікації вугілля найбільш поширеною є газифікація вугілля в потоці. До її переваг слід віднести можливість створення потужних парогазових установок (300 МВт і вище) на твердому паливі, що мають значний ККД (44–47 %), високу екологічну чистоту та найвищу питому продуктивність.

В переважній більшості газифікаторів процес відбувається під тиском 20–30 атм при температурі 1700–1900 °С на парокисневому дутті. Синтез-газ, що виробляється газифікатором, ефективно спалюється в газовій турбіні, де генерується понад 65 % електроенергії; решта електроенергії отримується в паровому циклі. В технологічних схемах газифікації утворюється менший об'єм газу, що потребує очистки. Запропонована система очистки сірки дає можливість отримувати товарні продукти на основі сірки. Шлак може бути використаний у будівельній галузі.

Існують можливості розширення паливної бази енергетики України (табл. 3). Загальновідомо, що в останнє десятиріччя в країні значно погіршилася якість енергетичного вугілля, що видобувається. Тонкі пласти вугілля в шахтах, велика глибина їх залягання, не-

досконала технологія видобутку та багато інших факторів призвели до значного погіршення якості вугілля при одночасному збільшенні ціни на нього. Водночас у муло- і шламонакопичувачах вуглезбагачувальних фабрик – близько 190 млн т вологих відходів з зольністю 45–70 %. Ці відходи після Perezбагачення можуть використовуватися в факельних котлоагрегатах, в існуючому стані – в котлоагрегатах ЦКШ, а при застосуванні технології "напівгрудкування" (розробленої Національним гірничим університетом) – в промислових і комунальних котлоагрегатах киплячого шару, в тому числі і тих, що використовуються на підприємствах вугільної галузі. Крім вологих відходів вуглезбагачення паливно-енергетичний потенціал держави може бути розширено за рахунок Perezбагачення сухих відходів антрациту (потенціал товарної продукції – 80 млн т), використання бурого (можливий рівень видобутку до 3 млн т у. п. на рік) та "солоного" вугілля (до 3,3 млн т у. п. на рік). Цього додаткового палива достатньо для забезпечення роботи 20 енергоблоків з ЦКШ-котлоагрегатами потужністю 200 МВт протягом 30 років.

Зважаючи на значні поклади в Україні вугілля для ТЕС та урану для атомних електростанцій, можна забезпечити енергетичну незалежність держави та задовольнити потреби в твердому паливі на 300–400 років, а також істотно зменшити споживання природного газу в енергетиці.