

АНАЛІЗ НАЯВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ РОЗДІЛЕННЯ ПОВІТРЯ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ СПАЛЮВАННЯ ПАЛИВА В ТЕПЛОЕНЕРГЕТИЦІ

Кулик М.П.¹, Кравець Т.Ю.², Семерак М.М.²

¹Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
вул. Карпатська, 15, 76019, м. Івано-Франківськ
m_p_kulik@ukr.net

²Національний університет «Львівська політехніка»
вул. Степана Бандери, 12, 79012, м. Львів
kravetst@ukr.net

Проведений аналіз проблем, пов'язаних зі спалюванням органічного палива в різних галузях промисловості: металургії, теплоенергетиці, комунальній сфері та інших технологічних процесах. Зазначено, що процес спалювання палива здебільшого проходить із коефіцієнтом надлишку повітря, що перевищує його стехіометричне значення. Наявність значної кількості азоту в повітрі є причиною утворення оксидів азоту, які за своєю природою належать до першого класу небезпеки. До переліку таких джерел забруднення навколишнього середовища належать також теплові електростанції.

Проведений аналіз процесів розділення повітря на кисень та азотну фракцію з метою використання повітря, збагаченого киснем, із метою інтенсифікації процесів спалювання. Процеси утворення оксидів азоту є ендотермічними і призводять до пониження загального коефіцієнта корисної дії теплоенергетичного об'єкта. Залишки азотної фракції після відбору кисню пропонується використати для формування робочого тіла газового циклу генерації електричної енергії, зменшити концентрацію оксидів азоту, а також зменшити об'єм димових газів, і загалом знижується валовий об'єм викидів.

Показано, що із трьох найбільш поширених технологій розділення повітря (криогенної, адсорбційної і мембранної) доцільніше використовувати мембранний метод. Крім того, використання в комбінованій парогазовій енергетичній установці парової і газової генерації підвищує маневреність та мобільність вугільних блоків електростанцій, які працюють на вітчизняному вугіллі низької якості. *Ключові слова:* розділення повітря, мембранний модуль, маневреність та мобільність енергетичної установки, підвищення ефективності спалювання палива.

Анализ существующих технологий разделения воздуха для повышения эффективности сжигания топлива в энергетике. Кулик М.П., Кравец Т.Ю., Семерак М.М. Проведен анализ проблем, касающихся сжигания органического топлива в различных отраслях промышленности: металлургии, теплоэнергетике, коммунальной сфере и других технологических процессах. Отмечено, что в большинстве случаев процесс сжигания топлива происходит с коэффициентом избытка воздуха, что превышает его стехиометрическое значение. Наличие чрезмерного количества атмосферного азота является причиной образования окислов азота, которые по своей природе относятся к I классу опасности. К числу таких источников загрязнения окружающей среды относятся тепловые электростанции.

Проанализированы также процессы разделения воздуха на кислород та азотную фракцию с целью использования воздуха, обогащенного кислородом, для интенсификации процессов сжигания. Процессы образования окислов азота являются эндотермическими, что приводит к сжижению общего коэффициента полезного действия теплоэнергетического объекта. Оставшуюся часть азотной фракции предложено использовать для формирования рабочего тела газового цикла генерации электрической энергии, что уменьшит концентрацию окислов азота, а также объем дымовых газов, и в общем снизится валовый объем выбросов.

Показано, что из трех наиболее развитых технологий разделения воздуха, к которым следует отнести криогенный, адсорбционный и мембранный, больше всего применим мембранный. Кроме того, использование в комбинированной парогазовой энергетической установке паровой и газовой генерации электроэнергии газовой генерации повысит маневренность и мобильность угольных блоков электростанций, работающих на углях низкого качества. *Ключевые слова:* разделение воздуха, мембранный модуль, маневренность та мобільність енергетическої установки, підвищення ефективності сжигания топлива.

Analysis of existing air separation technologies for efficiency increase of fuel combustion in thermal power engineering. Kulyk M.P., Kravets T.Yu., Semerak M.M. An analysis of the problems associated with combustion of organic fuels in various industries: metallurgy, heat energy, municipal utilities and other technological processes is conducted. It is stated that in most cases the process of fuel combustion happens with an excess air coefficient exceeding its stoichiometric value. Presence of a significant amount of nitrogen in the air causes nitrogen oxides formation, which by their nature belong to the first class of danger. Thermal power plants are also among such environment pollution sources.

An analysis of the processes of air separation into oxygen and nitrogen fraction was conducted to use oxygen-enriched air for intensifying of combustion processes. The processes of formation of nitrogen oxides are endothermic and lead to the overall efficiency decrease of a heat energy object. It is suggested to use the remnants of nitrogen fraction after oxygen withdrawal to form the working body of a gas cycle for electric power generation, to reduce the concentration of nitrogen oxides, volume of flue gases and generally decrease the gross volume of emissions.

It is shown that from the three most advanced technologies of air separation cryogenic, adsorption and membrane, it is more expedient to use a membrane method. In addition, its use in a combined steam and gas power plant increases maneuverability and mobility of power plants' coal units that operate on domestic coal of poor quality. *Key words:* air separation, membrane module, maneuverability and mobility of a power plant, efficiency increase of fuel combustion.

Постановка проблеми. Органічне паливо досить широко використовується в різних галузях промисловості, зокрема в металургії та енергетиці, комунальній сфері, для підігріву різноманітних реагентів у технологічних процесах або для перетворення чи накопичення тепла та виробництва електричної енергії. Більшість процесів спалювання проходить із так званим коефіцієнтом надлишку повітря, частка якого зазвичай є більшою за ту його кількість, яка впливає зі стехіометричного рівняння. Атмосферне повітря, крім кисню як традиційного окислювача, містить майже 79% азоту, що є джерелом утворення так званих швидких, або атмосферних, оксидів азоту. Оксиди азоту за своїми токсичними характеристиками належать до першого класу небезпеки, а за шкідливою дією на довкілля, поряд з іншими (сірчистий та сірчаний ангідрид, а також вуглекислий газ) є причиною формування кислотних дощів.

До переліку великих забруднювачів атмосферного повітря, крім підприємств чорної та кольорової металургії, входять об'єкти теплової енергетики, які в Україні вже на 70–90% вичерпали свій технологічний ресурс, а якість вугілля постійно погіршується. Енергетика України додатково характеризується нестачею маневрових потужностей, а останнім часом для покриття пікових навантажень використовуються вугільні блоки електростанцій, що додатково посилює техногенне навантаження на довкілля.

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Суттєво зменшити викиди шкідливих речовин та поліпшити маневрові характеристики вугільних блоків електростанцій, на яких реалізується парова генерація об'єктами теплової енергетики, можна шляхом поєднання в одній енергетичній установці парового та газового способу генерування електричної енергії. А для газового циклу генерації варто не використовувати дороге газотурбінне паливо, а сформувати для газової турбіни робоче тіло, яке нагрівається в міжкорпусному об'ємі циклонного передтопка при спалюванні в ньому частки помеленого вугілля з коефіцієнтом надлишку

повітря, меншим за одиницю. Для процесу спалювання, як у циклонному передтопку, так і в основній топці котельного агрегату, доцільно використовувати атмосферне повітря, збагачене киснем, а у міжкорпусний об'єм циклонного передтопка можна подавати азотну фракцію атмосферного повітря після його розділення на компоненти.

Виклад основного матеріалу. На рис. 1 наведена узагальнена блок-схема комбінованої енергетичної установки, яка має у своєму складі паровий цикл і газовий цикл генерації електричної енергії.

Детально така схема розглянута в роботі «Екологічні та техніко-економічні аспекти спільної роботи парогазотурбінних енергетичних установок» [1], де проаналізовані можливі коефіцієнти корисної дії парової і газової частини. У паровому циклі нараховуються чотири етапи перетворення скритої енергії твердого палива в електричну, а в газовій частині таких етапів лише три. За умови рівності к.к.д. окремих блоків парової та газової частини загальний к.к.д. верхнього ланцюжка для парової генерації буде дещо меншим (чотири множника) від такого самого коефіцієнта нижнього ланцюжка для газової генерації (три множники). Якщо початкові теплові потоки обох ланцюжків будуть приблизно однакові, а така ситуація досягається досить легко, то із врахуванням діапазонів коливання коефіцієнтів корисної дії парової частини (30–45%) та газового циклу генерації (50–55%), загальний коефіцієнт корисної дії комбінованої парогазотурбінної енергетичної установки, як мінімум, буде заходитися в діапазоні 40–50%.

Одна з можливих реалізацій двоступеневого спалювання твердого палива з використанням теплоти, отриманої на першому ступені, для забезпечення роботи газової турбіни запропонована в роботі «Спосіб роботи енергетичної установки» [2]. Принципова блочна схема запропонованої енергетичної установки наведена на рис. 2.

На рис. 2 показані: паровий котел 1 з основною топкою 2 і паровою турбіною 3. Перед топкою 2 у схему включена додаткова топка 4 з оболонкою охолодження для формування робочого тіла газового



Рис. 1. Блок-схема виробництва електроенергії на базі паротурбінної і газотурбінної установок

циклу генерації, в який включені також компресор 5 та газова турбіна 6 з окремим електричним генератором 7. Особливістю газової генерації електроенергії, запропонованої авторами роботи «Спосіб роботи енергетичної установки» [2] у розвиток пропозиції авторів [3], німецьких інженерів у далекому 1944 р., є заміна звичної камери спалювання дорогого газотурбінного палива оболонкою 8 охолодження циклонного передтопка. В паровій частині генерації ще знаходяться конденсатор 9 відпрацьованої пари та підігрівник 10 котлової води. З метою отримання робочого тіла газової генерації із різних циліндрів парової турбіни беруться відбори пари для подачі у газовий цикл генерації.

А для підвищення ефективності спалювання органічного палива, як показано в роботі «Підвищення ефективності спалювання органічного палива в комбінованих парогазових енергетичних установках» [4], доцільно використовувати не атмосферне повітря з певним коефіцієнтом надлишку, а певну частку його компонентів, збагачену киснем. При цьому азотну фракцію подають у газовий цикл генерації. Блок розділення повітря розміщують між компресором та газовою турбіною, повітря, збагачене киснем, подають у процес спалювання як у циклонний передтопок, так і в топку основного котельного агрегату.

На початковій стадії в оболонці охолодження додаткового циклонного передтопка формується робоче середовище (нагріте і попередньо стиснуте атмосферне повітря) для роботи газової турбіни.

Потоки вугільного пилу можуть перерозподілятися (частина іде в циклонний передтопок і потрапляє в котельний агрегат, інша частина потрапляє в котельний агрегат, минаючи додаткову топку циклонного типу).

Вибір оптимальної технології розділення повітря. У металургії вже досить давно використовується так зване «кисневе дуття», для якого кисень за місцем споживання отримують кріогенним способом. Однак кріогенне розділення повітря, з огляду на його високі характеристики щодо якості (чистота 99.5–99.85%), є досить дорогим способом отримання промислових газів (кисню, азоту та аргону).

Ще одним із можливих способів отримання кисню є гідроліз води електричним струмом від сонячних та вітрових електростанцій у години зниження споживання від них. Цей спосіб є досить вартісним, а також небезпечним через труднощі у зберіганні водню в очікуванні додаткової генерації шляхом його спалювання у котельних агрегатах. Деякі розвинуті країни Європейського Союзу при цьому повертають кисень назад в атмосферне повітря.

Більш простим та дешевшим способом збагачення киснем атмосферного повітря є його розчинення у звичайній воді, а потім її дегазація. При цьому варто пам'ятати, що обсяги розчинених газів пропорційні парціальним тискам основних компонентів в атмосферному повітрі. Відповідно до наближених розрахунків у 100 об'ємах води може розчинитися, при заданих умовах, 0.8 обсягів кисню і 1.6 обсягів

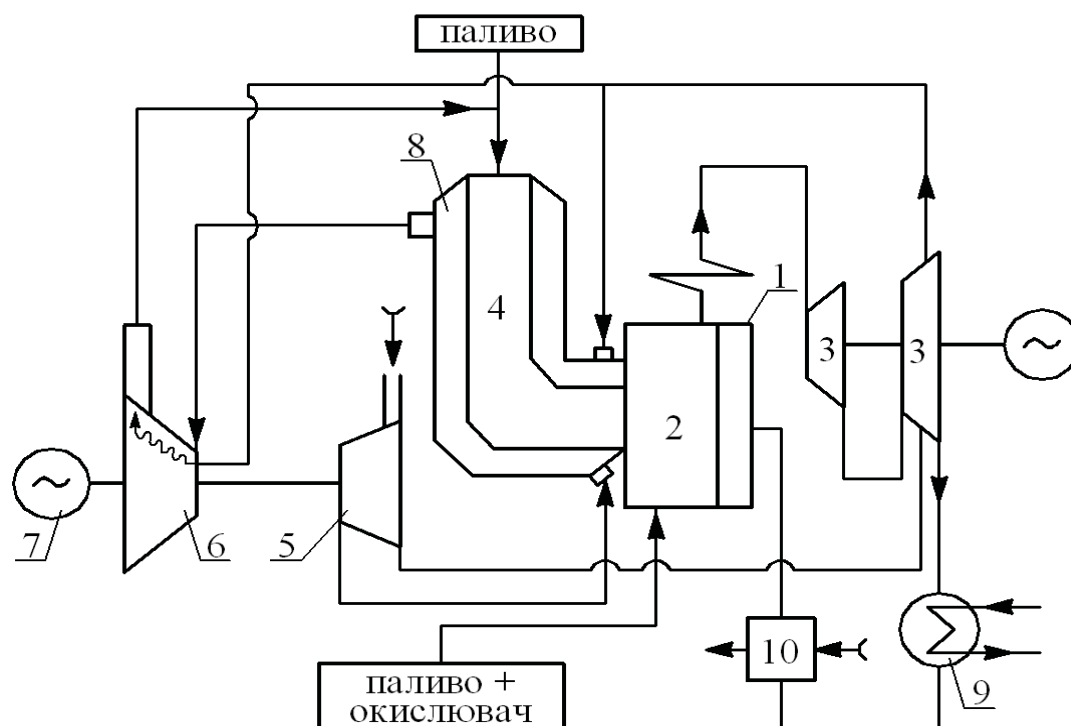


Рис. 2. Парогазова установка з циклонним передтопком парового котла:

- 1 – паровий котел; 2 – топка котла; 3 – парова турбіна; 4 – додаткова топка; 5 – компресор;
6 – газова турбіна; 7 – електричний генератор; 8 – оболонка охолодження; 9 – конденсатор;
10 – підігрівник котлової води

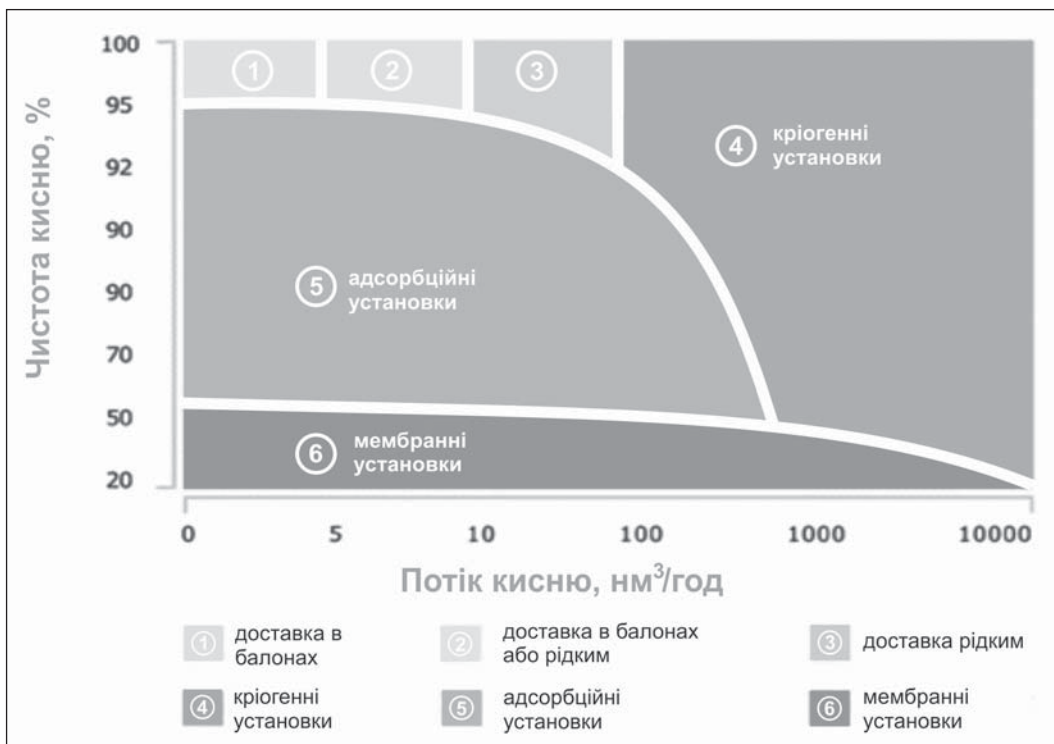


Рис. 3. Якісна характеристика процесу отримання кисню розділенням повітря за допомогою розглянутих технологій та способів доставки споживачу

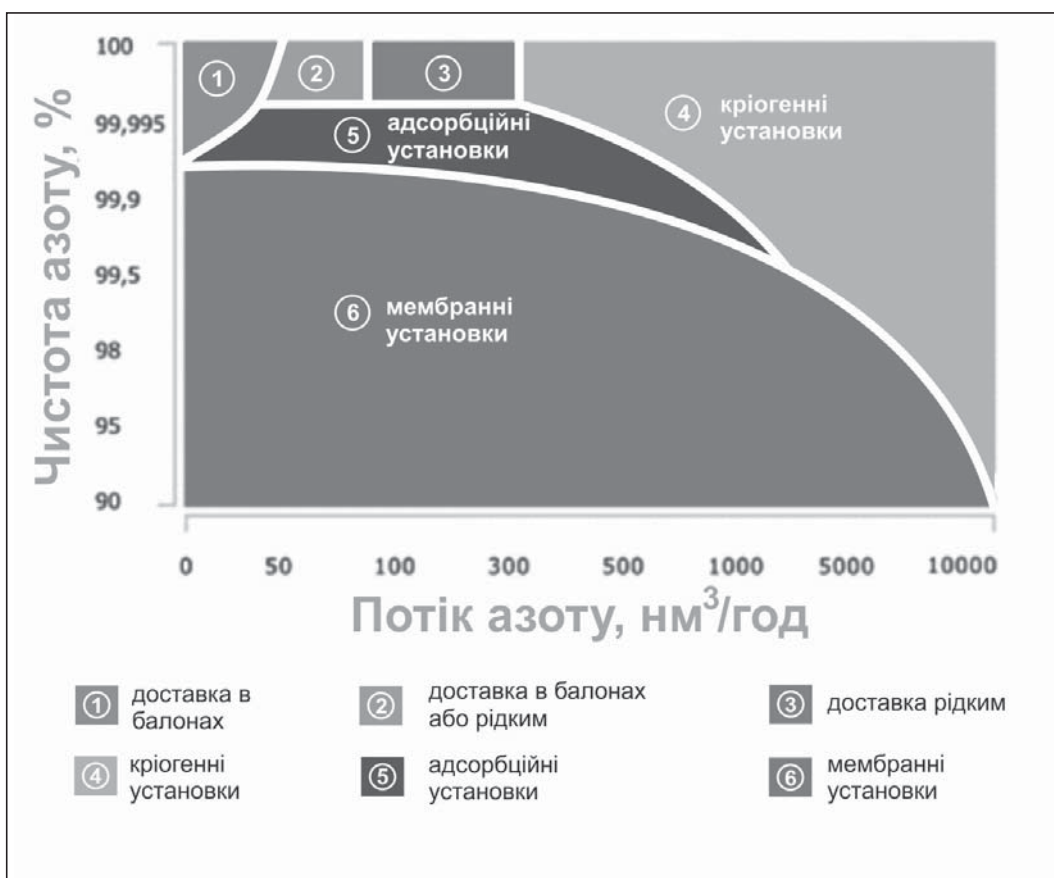


Рис. 4. Якісна характеристика процесу отримання азоту розділенням повітря за допомогою розглянутих технологій та способів доставки споживачу

атмосферного азоту. Нескладний за апаратурним оформленням процес дегазації води забезпечить збагачення киснем отриманої суміші у 1,5 раза.

Досить поширеним некріогенним методом розділення повітря як газових сумішей є адсорбційний метод, в основі якого лежить вибіркоче поглинання того чи іншого газу адсорбентами. Широке застосування метод отримав через такі переваги:

- високу розділювальну здатність завдяки правильному вибору адсорбенту;
- швидкий пуск та зупинка, а також швидка зміна продуктивності порівняно з криогенними установками;
- можливість дистанційного керування та автоматичного регулювання технологічним процесом;
- низькі енергетичні затрати та затрати на обслуговування, а також просте апаратурне оформлення.

Адсорбційний спосіб отримання азоту та кисню з атмосферного повітря забезпечує порівняно високі якісні характеристики при низькій собівартості, а для комбінованих парогазових енергетичних установок можливе комплексне використання як кисню для інтенсифікації процесу горіння, так і азоту для формування робочого тіла при газовому способі генерації електричної енергії.

При отриманні кисню адсорбційним способом азот поглинається алюмосилікатними молекулярними ситами значно швидше за кисень. Для відокремлення азоту від кисню повітря спочатку стискають, а потім пропускають через адсорбер, отримуючи на виході кисень. Адсорбент поглинає газ до стану рівноваги між адсорбцією і десорбцією. Після чого адсорбент необхідно регенерувати, тобто видалити з поверхні адсорбента поглинутий газ. Регенерація проводиться шляхом підвищення температури, або шляхом зниження тиску. Зазвичай використовують зниження тиску. Невелика тривалість циклів адсорбції і десорбції, як правило, в межах кількох хвилин і дала назву процесу – «короткоциклова адсорбція». Чистота кисню як кінцевого продукту може становити до 95%, що для вугільних блоків теплових електростанцій більш ніж достатньо.

Установки короткоциклової адсорбції повністю збираються заводом-виробником, випробовуються та здаються замовнику у повній виробничій готовності, що сприяє швидкому монтажу та наладці. Продуктивність таких установок – у діапазоні 10–6 000 м³/год.

У 70-х рр. минулого століття почалось промислове використання технології мембранного розділення повітря, що призвело до реальної революції в різних галузях промисловості. Нині ця технологія активно розвивається і сягає дедалі більшого поширення завдяки простоті реалізації та високій економічній ефективності. Суть роботи мембранної установки полягає в селективній проникності матеріалу мембрани різними компонентами газової суміші. З метою очищення повітря фільтрується, стискується до необхідного рівня, осушується та подається

на мембранний модуль. Більш швидкі молекули кисню та аргону проходять через полотно мембрани та збираються в окремому газгольдері. Сучасна газорозділювальна мембрана як основний елемент установки являє собою вже не пласку мембрану чи плівку, а пустотіле волокно. Пустотіла волоконна мембрана складається із пористого полімерного волокна із нанесеним на його зовнішню поверхню газорозділювальним шаром. Газовий потік під тиском подається в пучок мембранних волокон. Завдяки різниці парціальних тисків на зовнішній і внутрішній поверхнях мембрани відбувається поділ газового потоку. Чистота отриманих газів визначається кількістю модулів, через які проходить повітря. При цьому дедалі більшою стає концентрація азоту, а також у залишковій частині збільшується концентрація кисню. На рисунках 3 та 4 приведені якісні характеристики процесу розділення повітря на кисень та азот із метою порівняння та вибору придатних технологій для конкретних умов промислового використання.

Із рис. 3 стає зрозуміло, що найбільш придатною для використання отриманого при розділенні повітря кисню для інтенсифікації процесу спалювання твердого палива в теплоенергетичних установках в широкому діапазоні витрат окислювача може бути мембранна технологія, завдяки невисоким вимогам щодо його чистоти. Більша витрата кисню понад 10 000 нм³/год може забезпечуватися паралельним включенням мембранних модулів.

На рис. 4 приведена аналогічна порівняльна схема отримання іншого компонента газової суміші (атмосферного повітря) для формування на його основі робочого тіла газової частини комбінованої парогазової енергетичної установки. Як витікає із рис. 3 та рис. 4, тільки мембранна технологія може відповідати умові синхронності для отримання тієї самої кількості як збагаченого киснем атмосферного повітря для інтенсифікації процесу горіння, з однієї сторони, а з другої – азотної фракції для формування робочого тіла для циклу газової генерації електроенергії без спалювання дорогого газотурбінного палива.

Головні висновки. Лише застосовуючи мембранну технологію розділення атмосферного повітря на азотну фракцію при формуванні робочого тіла газової генерації, а також збагаченого киснем атмосферного повітря для інтенсифікації процесів спалювання низькоякісного вугілля вітчизняного видобутку, можна забезпечити дотримання вимог Європейського Союзу щодо екологічних нормативів, за умови швидкого переоснащення об'єктів теплової генерації на основі вугільних блоків. Мембранні газорозподільчі блоки завдяки відсутності рухомих частин характеризуються високою експлуатаційною надійністю. Розділюючі мембранні модулі є досить стійкими до виробничих вібрацій та механічних ударів, хімічно інертними до впливу масел, при згаданих концентраціях кисню, нечутливі до вологи, а

також функціонують у широкому діапазоні температур, характерних для виробничих площадок теплових станцій.

Ресурс мембранних модулів становить у середньому 150 тис. годин, що відповідає 15–20 рокам роботи енергоблоків.

Література

1. Семчук Я.М., Кулик М.П. Екологічні та техніко-економічні аспекти спільної роботи парогазотурбінних енергетичних установок. Нафтогазова енергетика. 2008. № 1(6). С. 65–68.
2. Грінченко Д.М., Кулик М.П. Спосіб роботи енергетичної установки. Авт. свід. СРСР №1188338, БВ № 40, 1985р.
3. Парогазова теплосилова установка. Патент ФРН № 839290, 1944.
4. Кулик М.П. Підвищення ефективності спалювання органічного палива в комбінованих парогазових енергетичних установках / М.П.Кулик, Т.Ю. Кравець. Науковий Вісник НЛТУ України. 2017. Вип. 27(6). С. 98–104.
5. Кириченко В.І. Некріогенні технології виробництва. 2. Мембранні системи виробництва кисню і перспективи їх розвитку / В.І. Кириченко, В.К. Осокіна, Б.Д. Рісюк, І.М. Новіков, О.Г. Голубов. Хім. пром-сть України. 2008. № 6. С. 58–68.