

RZECZPOSPOLITA
POLSKA



Urząd Patentowy
Rzeczypospolitej Polskiej

(12) **OPIS PATENTOWY**

(19) **PL**

(11) **231428**

(13) **B1**

(21) Numer zgłoszenia: **413675**

(22) Data zgłoszenia: **26.08.2015**

(51) Int.Cl.

B01D 53/14 (2006.01)

B01D 53/62 (2006.01)

Opis patentowy
przedrukowano ze względu
na zauważone błędy

(54)

Sposób usuwania ditlenku węgla z gazów spalinowych

(43) Zgłoszenie ogłoszono:

27.02.2017 BUP 05/17

(45) O udzieleniu patentu ogłoszono:

28.02.2019 WUP 02/19

(73) Uprawniony z patentu:

**INSTYTUT CIĘŻKIEJ SYNTEZY ORGANICZNEJ
BLACHOWNIA, Kędzierzyn-Koźle, PL**

**INSTYTUT CHEMICZNEJ PRZERÓBKİ WĘGLA,
Zabrze, PL**

**TAURON POLSKA ENERGIA
SPÓŁKA AKCYJNA, Katowice, PL**

**TAURON WYTWARZANIE
SPÓŁKA AKCYJNA, Jaworzno, PL**

(72) Twórca(y) wynalazku:

ZBIGNIEW BUDNER, Kędzierzyn-Koźle, PL

TOMASZ ŁADAK, Kędzierzyn-Koźle, PL

ALEKSANDER SOBOLEWSKI, Zabrze, PL

MAREK ŚCIAŻKO, Katowice, PL

ADAM TATARCZUK, Zabrze, PL

JANUSZ TCHÓRZ, Orzesze, PL

STANISŁAW TOKARSKI, Jaworzno, PL

LUCYNA WIĘCŁAW-SOLNY, Chorzów, PL

ANDRZEJ WILK, Gliwice, PL

JAN WÓJCIK, Zalesie Śląskie, PL

(74) Pełnomocnik:

rzecz. pat. Łukasz Korga

PL 231428 B1

Opis wynalazku

Przedmiotem wynalazku jest sposób usuwania ditlenku węgla z gazów spalinowych przede wszystkim z instalacji przemysłowych.

Rozwój przemysłu od początku XIX wieku związany jest nieodłącznie z ciągłym wzrostem wytwarzania energii, której podstawowym źródłem stały się paliwa kopalne. Większość technologii wytwarzania energii wiąże się z procesami spalania, w wyniku których oprócz odpadowego ciepła technologicznego, do atmosfery emitowane są duże ilości zanieczyszczeń, w szczególności pyły i gazy kwaśne. W drugiej połowie XX wieku praktycznie wyeliminowano emisję pyłów poprzez stosowanie elektrofiltrów, jednakże wraz z identyfikacją zagrożeń klimatycznych związanych z emisją kwaśnych gazów, zaistniała potrzeba ich eliminacji lub redukcji. Obecnie wciąż niemożliwe jest zastąpienie kopalnych źródeł energii energią odnawialną, dlatego też niezbędne stało się opracowanie technik usuwania kwaśnych gazów ze spalin, a zwłaszcza ditlenku siarki, tlenków azotu i ditlenku węgla. Od lat 30-tych XX wieku powstają technologie myć aminowych, które pozwalają na usuwanie ditlenku węgla. Obecnie, wymogi Unii Europejskiej nakładają na producentów energii obowiązek redukcji emisji CO₂, który został uznany za jeden z głównych czynników powodujących zmiany klimatyczne, efekt cieplarniany. Powstaje wiele technologii ukierunkowanych na usuwanie CO₂ ze spalin i wykorzystanie lub składowanie, sekwestrację CO₂, jednakże w tym celu niezbędne jest opracowanie taniej i efektywnej metody wydzielania CO₂ z gazów spalinowych, zwłaszcza dużych bloków energetycznych.

W technologiach i instalacjach CCS usuwania ditlenku węgla z gazów spalinowych bloków energetycznych średniej i dużej mocy w pracujących obecnie w Świecie, w skali demonstracyjnej i w instalacjach powiązanych z sekwestracją ciekłego ditlenku węgla stosowane są obecnie najczęściej technologie myć aminowych. Wadą stosowanych obecnie rozwiązań technologicznych jest wysokie zużycie energii cieplnej, związane głównie z regeneracją termiczną roztworów absorpcyjnych, desorpcją CO₂, powodujące obniżenie mocy energetycznej bloków o 20÷30%, co przy obecnie obowiązujących uregulowaniach prawnych i międzynarodowych przekreśla praktycznie sensowność stosowania tych technologii w większej skali.

W poszukiwaniu sposobów obniżania energochłonności procesów absorpcyjnych usuwania ditlenku węgla z gazów spalinowych obserwuje się obecnie dwa zasadnicze kierunki rozwoju technologii myć aminowych i w ogólności rozwoju technologii absorpcyjnych. Pierwszy kierunek poszukiwania nowych rozwiązań polega na unowocześnianiu i rozwiązywaniu szczegółowych zagadnień wymiany masy i ciepła w obrębie regeneratorów roztworów absorpcyjnych, wysp wymienników ciepła oraz integracji pracy regeneratorów z blokami energetycznymi. Drugi kierunek rozwoju technologii ukierunkowany jest na poszukiwanie nowych klas i rodzajów roztworów absorpcyjnych, charakteryzujących się istotnie obniżonym zużyciem energii w procesie regeneracji, desorpcji ditlenku węgla.

Chiński patent CN 101612509 dotyczy zastosowania roztworu absorpcyjnego do absorpcji CO₂ z mieszanin gazowych. W patencie zaproponowano stosowanie roztworów, gdzie głównym składnikiem jest MEA (monoetanolamina) oraz AEE (2-(2-aminoetylamino)etanol), składnikami pomocniczymi AHPD (2-amino-2-hydroksymetylo-1,3-propandiol), AMP (2-amino-2-metylo-1-propanol) TEA (trietanolamina) oraz MDEA (N-metylodietanolamina). Jako aktywatory wymieniono PZ (piperazyna), HEPZ (hydroksyetylopiperazyna), AEP oraz DEA, natomiast rozpuszczalnikiem jest mieszanina NMP, glikolu polietylenowego, węglanu propylenu oraz woda. Zastosowanie mieszanego rozpuszczalnika pozwala na zwiększenie tempa desorpcji oraz poprawienie efektywności energetycznej desorpcji.

Patent EP 0920901 opisuje proces oczyszczania gazów technicznych od CO₂ oraz związków siarki poprzez absorpcję w roztworach NFM (N-formylomorfoliny) oraz NAM (N-acetylomorfoliny) na drodze absorpcji czysto fizycznej. Opisany proces jest ukierunkowany na oczyszczanie gazu ziemnego oraz syntezowego w absorberze pod ciśnieniem 10–150 atm.

Koreański patent KR 20110088206 opisuje proces, gdzie w skład roztworu absorpcyjnego wchodzi MDEA, cykliczna amina oraz woda.

Aktywatorami reakcji są heterocykliczne aminy: 2-metylopiperazyna, trans piperazyna, 2,5-dimetylopiperazyna, 2-metylopiperazyna, N-etylopiperazyna, kwas pipekolinowy, kwas izonipekotynowy, izonipekotynian metylu, N-alkilo-3-pipekolina, oraz ich mieszaniny.

Patent rosyjski RU 2010101220 dotyczy zastosowania absorbentu, aparatury oraz metody wydzielania CO₂ i H₂S. W skład absorbentu wchodzi 30–55% mas. 2-N-butyloaminoetanolu lub 2-etyloaminoetanolu oraz 1–30% wagowych związków zawierających dwa atomy azotu. Do wymienionych

związków zaliczono liniowe lub cykliczne aminy zawierające aminy pierwszo- lub drugorzędowe. Roztwory absorpcyjne zawierają również wodę.

Patent EP 0879631 dotyczy procesu oczyszczania gazów od CO₂, w szczególności gazów spalinowych. Absorbentami są wodne roztwory amin pierwszo- i drugorzędowych, zawierających w podstawnikach wodór lub grupy alkilowe, lub wodne roztwory powyższych amin i piperazyny i pochodnych piperazyny, lub amin drugo- i trzeciorzędowych w stężeniach 10–45% wagowych.

W patencie japońskim JP 8257354 proponuje się oczyszczanie absorpcyjne gazów spalinowych od CO₂ poprzez stosowanie wodnych roztworów związków aminowych zawierających piperazynę i jej pochodne metylowe i dimetylowe. W skład absorbentu opisanego w wynalazku wchodzi 15–65% mas. wnioskowanych amin oraz 1,5–65% mas związków pochodnych piperazyny.

W patencie CN 1608712 opisano roztwór przeznaczony do oczyszczania gazu syntezowego, naturalnego, miejskiego oraz innych mieszanin z ditlenku węgla oraz dodatkowo z związków siarki. W patencie zakłada się podwyższenie stopnia oczyszczenia gazów poprzez stosowanie wodnych roztworów MDEA aktywowanych związkami morfoliny, piperazyny lub dietanoloaminy.

Patent RU 2244587 dotyczy składu absorbentu do procesu głębokiego oczyszczania gazów z ditlenku węgla w warunkach podwyższonego ciśnienia, w szczególności przeznaczonych do procesów wytwarzania wodoru lub amoniaku. Absorbentem są wodne roztwory MDEA, piperazyny, węglanu potasu oraz morfoliny. Wynalazek pozwala na obniżenie ciśnienia równowagowego i podwyższenie stopnia absorpcji CO₂ przy niskich stopniach nasycenia (~0,1 mola CO₂/mol trzeciorzędowej aminy) przy zachowaniu podobnej szybkości desorpcji ditlenku węgla.

Patent US 4775519 opisuje ciągły proces oczyszczania strumieni gazowych zawierających kwaśne gazy, w szczególności CO₂, gdzie strumień gazowy kontaktuje się w strefie absorpcyjnej z roztworem zawierającym 40–60% wagowych N-metyldietanoloaminy i 5–15% imidazolu lub pochodnej imidazolu z podstawnikiem metylowym.

W patencie chińskim CN101804292 opisano skład aktywowanego roztworu MDEA przeznaczonego do wydzielania CO₂ metodami absorpcyjnymi. W skład mieszany wchodzi 35–50% wagowych MDEA, 5–20% niskiej lepkości cieczy jonowej, 15–30% eteru dimetylowego glikolu polietylenowego oraz 15–30% wody. Zaletą roztworu o takim składzie są wysokie współczynniki przenikania masy w trakcie procesu absorpcji/desorpcji oraz obniżenie ilości ciepła potrzebnego do procesu regeneracji.

W patencie DE 10139453 opisano proces usuwania składników kwaśnych (głównie CO₂) z mieszanin gazowych poprzez absorpcję w wodnym roztworze MDEA oraz piperazyny. Sumaryczna zawartość amin waha się w granicach 20–70% wagowych. Stosunek masowy MDEA do piperazyny waha się w granicach 9–15. Do procesu sugeruje się stosowanie roztworów zawierających 45–55% amin a stosunek MDEA: piperazyna waha się w granicach 13–15.

Z przedstawionego stanu wiedzy i opisów patentowych wynika, że opracowane dotychczas sposoby usuwania ditlenku węgla z gazów spalinowych i roztwory absorpcyjne stosowane w tych sposobach nie spełniają wymogów realizacji niskoenergetycznego, ekonomicznie uzasadnionego sposobu usuwania ditlenku węgla z gazów spalinowych. Istnieje zatem potrzeba opracowania nowych sposobów usuwania ditlenku węgla z gazów spalinowych bloków energetycznych poprzez zastosowanie nowej generacji roztworów absorpcyjnych, charakteryzujących się niskimi wartościami różniczkowych i całkowych zmian entalpii absorpcji ditlenku węgla i charakteryzujących się wysokimi współczynnikami przyspieszenia absorpcji w fazie ciekłej w sensie modelu absorpcji z reakcją chemiczną Danckwerts'a i Hatty, lub teorii penetracyjnej Higbiego i jednocześnie charakteryzujących się niskimi wartościami stałych Henry'ego.

Celem wynalazku było opracowanie niskoenergetycznego, ekonomicznie uzasadnionego sposobu usuwania ditlenku węgla z gazów spalinowych.

Nieoczekiwanie okazało się, że możliwe jest skuteczne usuwanie ditlenku węgla poprzez absorpcję z reakcją chemiczną w roztworze absorpcyjnym zawierającym rozpuszczalnik organiczny, wodę, trzeciorzędową alkanoloaminę, pierwszorzędową alkanoloaminę, aktywator organiczny, charakteryzującym się niskimi wartościami różniczkowych i całkowych zmian entalpii absorpcji ditlenku węgla i charakteryzującym się niskimi wartościami stałych Henry'ego oraz wysokimi współczynnikami przyspieszenia absorpcji z reakcją chemiczną w fazie ciekłej, poprzez:

- przeciwprądowe kontaktowanie gazu spalinowego z roztworem absorpcyjnym w aparacie kolumnowym zawierającym wypełnienie lub półki,
- ogrzanie nasyconego ditlenkiem węgla roztworu absorpcyjnego,

- kontaktowanie nasyconego ditlenkiem węgla roztworu absorpcyjnego z parą wodną,
- schłodzenie roztworu absorpcyjnego uwolnionego od ditlenku węgla i zawrócenie go w obiegu zamkniętym do procesu absorpcji.

Istota sposobu według wynalazku polega na tym, że wstępnie oczyszczone gazy spalinowe zawierające 10–30% molowych CO₂ wprowadza się do kolumny absorpcyjnej zaopatrzonej w wypełnienie lub półki, a w przeciwnym kierunku wprowadza się roztwór absorpcyjny zawierający N-metylopirolidon i/lub N-formylmorfolinę w roli rozpuszczalnika organicznego, wodę, trzeciorzędową alkanoloaminę, pierwszorzędową alkanoloaminę, aktywator organiczny, charakteryzujący się niskimi wartościami różniczkowych i całkowitych zmian entalpii absorpcji ditlenku węgla i charakteryzujący się niskimi wartościami stałych Henry'ego oraz wysokimi współczynnikami przyspieszenia absorpcji z reakcją chemiczną w fazie ciekłej, przy czym proces prowadzi się w temperaturze 0–60°C i pod ciśnieniem 90÷300 kPa absolutnych.

- nasycony ditlenkiem węgla roztwór absorpcyjny ogrzewa się do temperatury 80–150°C,
- z nasyconego ditlenkiem węgla roztworu absorpcyjnego ditlenek węgla desorbuje się parą wodną, w przeciwnym kierunku w kolumnie regeneracyjnej, w temperaturze 100÷200°C i pod ciśnieniem 90÷300 kPa absolutnych,
- roztwór absorpcyjny pozbawiony ditlenku węgla schładza się i zawraca do obiegu zamkniętym do procesu absorpcji.

Korzystnie jest, jeżeli jako rozpuszczalnik organiczny stosuje się N-metylopirolidon i/lub N-formylmorfolinę.

Korzystnie jest, jeżeli ditlenek węgla desorbuje się w przeciwnym aparacie kolumnowym zawierającym wypełnienie.

Korzystnie jest, jeżeli stosuje się roztwór absorpcyjny zawierający 0,5÷2,0 mol/dm³ metyldietanoloaminy i/lub etyldietanoloaminy i/lub izopropylodietanoloaminy w roli trzeciorzędowej alkanoloaminy.

Korzystnie jest, jeżeli stosuje się roztwór absorpcyjny zawierający 0,2÷1 mol/dm³ monoetanoloaminy i/lub izopropanoloaminy w roli pierwszorzędowej alkanoloaminy.

Korzystnie jest, jeżeli stosuje się roztwór absorpcyjny zawierający 0,1 do 0,6 mol/dm³ piperazyny i/lub N-metylopiperazyny i/lub N-formylopiperazyny w roli aktywatora organicznego.

Korzystnie jest, jeżeli stosuje się roztwór absorpcyjny zawierający co najmniej 9 moli wody/dm³.

Sposobem według wynalazku ditlenek węgla usuwa się poprzez absorpcję z reakcją chemiczną i poprzez przeciwnie kontaktowanie gazu spalinowego w aparacie kolumnowym zawierającym wypełnienie lub półki dla realizacji kontaktu faz, z roztworem absorpcyjnym zawierającym rozpuszczalnik organiczny, N-metylopirolidon i, lub N-formylmorfolinę, wodę, trzeciorzędową alkanoloaminę, pierwszorzędową alkanoloaminę i aktywator organiczny. Absorpcję ditlenku węgla prowadzi się w temperaturze 0–60°C, pod ciśnieniem 90÷300 kPa absolutnych. Nasycony ditlenkiem węgla roztwór absorpcyjny ogrzewa się do temperatury 80÷150°C i następnie kontaktuje się roztwór w przeciwnym aparacie kolumnowym zawierającym wypełnienie i/lub półki, z parą wodną pod ciśnieniem 90÷300 kPa absolutnych i w temperaturze 100÷200°C, a uwolniony od ditlenku węgla roztwór absorpcyjny schładza się i zawraca się w obiegu zamkniętym do absorpcji ditlenku węgla z gazów spalinowych.

Absorpcję ditlenku węgla z gazów spalinowych wykonuje się w roztworach zawierających rozpuszczalnik organiczny: N-metylopirolidon i/lub N-formylmorfolinę, alkanoloaminę trzeciorzędową w stężeniu od 0,5 do 2 mol/dm³, alkanoloaminę pierwszorzędową w stężeniu od 0,2 do 1 mol/dm³, aktywator organiczny w stężeniu od 0,1 do 0,6 mol/dm³ oraz wodę w stężeniu nie mniejszym niż 9 mol/dm³.

Graniczne najwyższe zawartości alkanoloamin i aktywatorów wynikają z wzajemnych rozpuszczalności tychże, w bazowym rozpuszczalniku będącym mieszaniną rozpuszczalników organicznych i wody, przy przekroczeniu których powstają dwie fazy roztworu, wodna i organiczna i istnieje możliwość krystalizacji z roztworu aktywatorów. Najniższe graniczne zawartości alkanoloamin i aktywatorów są spowodowane zanikiem synergetycznego oddziaływania pomiędzy tymi składnikami na przebieg reakcji w fazie ciekłej. Najniższa zawartość wody w roztworze absorpcyjnym wynika z zaniku oddziaływań protonolitycznych i gwałtownego obniżenia szybkości reakcji, wzrostu energii aktywacji reakcji.

Działanie i synergetyczne współdziałanie i wpływ na parametry i właściwości użytkowe roztworu absorpcyjnego poszczególnych składników roztworu absorpcyjnego według wynalazku są określone następująco:

- zastosowanie rozpuszczalnika organicznego N-metylopirolidonu i/lub N-formylmorfoliny o określonych parametrach równania Hansena δ_T , δ_d , δ_p , δ_h decyduje o wielkości zmian entalpii dla absorpcji ditlenku węgla, decyduje o wielkości różniczkowego i całkowitego

ciepła absorpcji ditlenku węgla w roztworze absorpcyjnym, a także decyduje o kinetyce reakcji w fazie ciekłej, energii aktywacji reakcji ditlenku węgla w fazie ciekłej. Spełnienie określonych warunków określonych równaniem Hansena zmniejsza składową dysocjacyjną zmiany entalpii dla absorpcji ditlenku węgla, jednocześnie wysokie wartości składowych: dyspersyjnej i polaryzacyjnej powodują uzyskanie niskich, korzystnych wartości stałych Henry'ego dla rozpuszczalności dwutlenku węgla,

- alkanoloamina trzeciorzędowa: metyldietanoloamina, etyldietanoloamina, izopropylo-dietanoloamina spełnia rolę alkalicznego składnika bazowego wiążącego ditlenek węgla w roztworze w sposób odwracalny i reagującego według mechanizmu „zwiterion” (przeniesienia jonów wodorowęglanowych kolejno z aktywatora do alkanoloaminy pierwszorzędowej, następnie do alkanoloaminy trzeciorzędowej),
- alkanoloamina pierwszorzędowa: monoetanoloamina, izopropanoloamina spełnia rolę pośredniego przeniesienia ditlenku węgla z organicznego aktywatora zawierającego azot heterocykliczny według mechanizmu karbaminianowego do alkanoloaminy trzeciorzędowej z pominięciem i ominięciem powolnego mechanizmu wodorowęglanowego reakcji,
- aktywator organiczny, związek heterocykliczny zawierający heteroatom azotu: piperazyna, N-metylopiperazyna, N-formylopiperazyna jest pierwszym składnikiem reagującym w fazie ciekłej według mechanizmu karbaminianowego z najwyższą szybkością reakcji i przenoszącym ditlenek węgla do alkanoloaminy pierwszorzędowej według mechanizmu karbaminianowego,
- woda, w niezbędnym stężeniu powoduje dysocjację alkanoloamin i aktywatorów; uruchamia i przyspiesza reakcje protonolityczne, jednak powoduje w skutek dysocjacji alkanoloamin wzrost składowej dysocjacyjnej zmiany entalpii dla absorpcji ditlenku węgla.

Zastosowanie alkanoloamin: trzeciorzędowej, pierwszorzędowej oraz aktywatora wykazuje działanie synergetyczne na wzrost szybkości reakcji w fazie ciekłej, jednocześnie wzrastają równowagowe pojemności absorpcyjne roztworów względem ditlenku węgla.

Zastosowanie N-metylopirolidonu i N-formylomorfoliny jako rozpuszczalnika organicznego i odpowiedniej dawki wody w roztworze absorpcyjnym, powoduje wzrost współczynników wymiany masy w mechanizmie absorpcji z reakcją chemiczną poprzez z jednej strony obniżenie wartości stałej Henry'ego, a z drugiej strony poprzez obniżenie wartości energii aktywacji reakcji.

Przykład 1

Jako roztwór absorpcyjny stosuje się metyldietanoloaminę w stężeniu 2 mol/dm^3 , monoetanoloaminę w stężeniu 1 mol/dm^3 , piperazynę w stężeniu $0,6 \text{ mol/dm}^3$, wodę w stężeniu 12 mol/dm^3 oraz jako uzupełnienie do stu procent N-metylopirolidon w roli rozpuszczalnika organicznego.

Roztwór charakteryzuje się następującymi danymi fizykochemicznymi:

- stała Henry'ego w temperaturze 30°C $1780 \text{ kPa}\cdot\text{dm}^3/\text{mol}$,
- całkowita zmiana entalpii absorpcji -23000 J/mol ,
- pojemność absorpcyjna równowagowa pod ciśnieniem 50 kPa abs. $1,6 \text{ mol CO}_2/\text{dm}^3$,
- energia aktywacji reakcji: -35000 J/mol .

W instalacji pilotowej zawierającej:

- kolumnę absorpcyjną o średnicy 265 mm i zawierającą w dolnej części warstwę wypełnienia ceramicznego Novalox 13 VFF o wysokości 2 m i w górnej części warstwę wypełnienia siodełka Berla 10 VFF o wysokości $1,2 \text{ m}$,
- wyspę płytowych wymienników ciepła,
- kolumnę regeneracyjną o średnicy 265 mm zawierającą dwie warstwy wypełnienia, dolną o wysokości 1000 mm z wypełnieniem metalowym Interpak 10 VFF, górną o wysokości 1600 mm z wypełnieniem metalowym Interpak 15 VFF,

z wstępnie oczyszczonego gazu spalinowego w ilości $106 \text{ Nm}^3/\text{h}$ i zawierającego 12% molowych CO_2 , usuwa się CO_2 , prowadząc proces absorpcji w średniej temperaturze 30°C i pod ciśnieniem 150 kPa absolutnych i prowadząc proces desorpcji CO_2 z nasyconego roztworu absorpcyjnego w kolumnie regeneracyjnej pod ciśnieniem 150 kPa i w temperaturze na dole kolumny na poziomie $120\text{--}125^\circ\text{C}$, stosując przepływ $550 \text{ dm}^3/\text{h}$ roztworu absorpcyjnego w obiegu zamkniętym. W oczyszczonym gazie zawartość CO_2 wynosi $0,8\pm 0,9\%$ objętościowych, sprawność usuwania CO_2 wynosi 93% . Obliczone z bilansu zużycie ciepła w całej instalacji na wykonanie regeneracji roztworu absorpcyjnego wynosi $7,8\pm 8,0 \text{ MJ/m}^3$ zdesorbowanego CO_2 .

Przykład 2

Jako roztwór absorpcyjny stosuje się: metyldietanoloaminę w stężeniu 2 mol/dm³, monoetanolaminę w stężeniu 1 mol/dm³, piperazynę w stężeniu 0,6 mol/dm³ i wodę w stężeniu 12 mol/dm³ oraz jako uzupełnienie do stu procent N-formylmorfolinę w roli rozpuszczalnika organicznego.

Roztwór absorpcyjny charakteryzuje się następującymi danymi fizykochemicznymi:

- stała Henry'ego w temperaturze 30°C 2100 kPa·dm³/mol,
- całkowita zmiana entalpii absorpcji -22000 J/mol,
- pojemność absorpcyjna równowagowa pod ciśnieniem 50 kPa absolutnych 1,7 mol CO₂/dm³,
- energia aktywacji reakcji: -32000 J/mol.

W instalacji pilotowej jak w przykładzie 1, z wstępnie oczyszczonego gazu spalinowego w ilości 106 Nm³/h i zawierającego 12% molowych CO₂, usuwa się CO₂, prowadząc proces absorpcji w średniej temperaturze 30°C i pod ciśnieniem 150 kPa absolutnych i prowadząc proces desorpcji CO₂ z nasyczonego roztworu absorpcyjnego w kolumnie regeneracyjnej pod ciśnieniem 150 kPa i w temperaturze na dole kolumny poziomie 115–120°C. stosując przepływ 500 dm³/h roztworu absorpcyjnego w obiegu zamkniętym. W oczyszczonym gazie zawartość CO₂ wynosi 0,75÷0,8% objętościowych, sprawność usuwania CO₂ równa jest 94%. Obliczone z bilansu zużycie ciepła w całej instalacji na wykonanie regeneracji roztworu absorpcyjnego wynosi 7,5÷7,8 MJ/m³ zdesorbowanego CO₂.

Przykład 3 (porównawczy)

W instalacji pilotowej jak w przykładzie 1 z wstępnie oczyszczonego gazu spalinowego w ilości 106 Nm³/h i zawierającego 12% molowych CO₂, usuwa się CO₂ prowadząc proces absorpcji w wodnym roztworze monoetanolaminy o stężeniu 20% wagowych, to jest o stężeniu 3,3 moli/dm³. Proces absorpcji prowadzi się pod ciśnieniem 150 kPa absolutnych i w temperaturze średniej 30°C. Proces desorpcji CO₂ prowadzi się w temperaturze na dole kolumny regeneracyjnej 117–120°C i pod ciśnieniem 150 kPa absolutnych, stosując przepływ 600÷630 dm³/h roztworu absorpcyjnego w obiegu zamkniętym. W oczyszczonym gazie zawartość CO₂ wynosi 1,4% objętościowych. Sprawność usuwania CO₂ wynosi 90%. Obliczone z bilansu zużycie ciepła w całej instalacji na wykonanie regeneracji roztworu absorpcyjnego wynosi 11,9 MJ/m³ zdesorbowanego CO₂.

Przy zastosowaniu sposobu i roztworu absorpcyjnego według wynalazku możliwe jest usuwanie ditlenku węgla z gazów spalinowych ze sprawnością 93–95%, przy jednoczesnym zmniejszeniu zużycia ciepła o 34÷37%.

Zastrzeżenia patentowe

1. Sposób usuwania ditlenku węgla z gazów spalinowych, **znamienny tym**, że:
 - wstępnie oczyszczone gazy spalinowe zawierające 10–30% molowych CO₂ wprowadza się do kolumny absorpcyjnej zaopatrzonej w wypełnienie lub półki, a w przeciwnym kierunku wprowadza się roztwór absorpcyjny zawierający N-metylopirolidon i/lub N-formylmorfolinę w roli rozpuszczalnika organicznego, wodę, trzeciorzędową alkanoloaminę, pierwszorzędową alkanoloaminę, aktywator organiczny, charakteryzujący się niskimi wartościami różniczkowych i całkowitych zmian entalpii absorpcji ditlenku węgla i charakteryzujący się niskimi wartościami stałych Henry'ego oraz wysokimi współczynnikami przyspieszenia absorpcji z reakcją chemiczną w fazie ciekłej, przy czym proces prowadzi się w temperaturze 0–60°C i pod ciśnieniem 90÷300 kPa absolutnych,
 - nasycony ditlenkiem węgla roztwór absorpcyjny ogrzewa się do temperatury 80–150°C,
 - z nasyconego ditlenkiem węgla roztworu absorpcyjnego ditlenek węgla desorbuje się parą wodną w przeciwną kolumnie regeneracyjnej, w temperaturze 100÷200°C i pod ciśnieniem 90÷300 kPa absolutnych.
 - roztwór absorpcyjny pozbawiony ditlenku węgla schładza się i zawraca do obiegu zamkniętego do procesu absorpcji.
2. Sposób według zastrz. 1, **znamienny tym**, że ditlenek węgla desorbuje się w przeciwnym aparacie kolumnowym zawierającym wypełnienie.
3. Sposób według zastrz. 1, **znamienny tym**, że stosuje się roztwór absorpcyjny zawierający 0,5÷2,0 mol/dm³ metyldietanoloaminy i/lub etyldietanoloaminy i/lub izopropyldietanoloaminy w roli trzeciorzędowej alkanoloaminy.

4. Sposób według zastrz. 1, **znamienny tym**, że stosuje się roztwór absorpcyjny zawierający $0,2 \div 1 \text{ mol/dm}^3$ monoetanolaminy i/lub izopropanoloaminy w roli pierwszorzędowej alkanoloaminy.
5. Sposób według zastrz. 1, **znamienny tym**, że stosuje się roztwór absorpcyjny zawierający $0,1$ do $0,6 \text{ mol/dm}^3$ piperazyny i/lub N-metylopiperazyny i/lub N-formylopiperazyny w roli aktywatora organicznego.
6. Sposób według zastrz. 1, **znamienny tym**, że stosuje się roztwór absorpcyjny zawierający co najmniej 9 moli wody/dm^3 .

