

Model i projekt instalacji dla procesu wydobycia i wstępnego przygotowania gazu ziemnego

Robert Bączyk, Maciej Jóźwiak

Instytut Automatyki i Inżynierii Informatycznej, Wydział Elektryczny, Politechnika Poznańska

Streszczenie: W niniejszym opracowaniu opisano przebieg kolejnych etapów procesu wydobycia i wstępnego przygotowania gazu ziemnego; przedstawiono problematykę projektowania instalacji dla tego procesu oraz jego modelowanie. Zaprezentowano dobór urządzeń technologicznych i pomiarowych. Przedstawiono wypracowania modelu matematycznego dla kolejnych etapów procesu. Przeprowadzono symulacje i zaprezentowano wyniki. Opracowanie zakończono podsumowaniem oraz wnioskami.

Słowa kluczowe: wydobycie gazu ziemnego, redukcja ciśnienia, projektowanie i modelowanie instalacji automatyki, dobór nastaw regulatorów

1. Wprowadzenie

Na przestrzeni ostatnich lat obserwuje się dążenie do maksymalnej automatyzacji procesów wytwórczych. W celu obniżenia kosztów produkcji, lepszej kontroli procesów technologicznych oraz dla zapewnienia bezpieczeństwa stosuje się nowoczesne układy sterowania i automatycznej regulacji.

W przypadku procesów szybkozmiennych i niebezpiecznych istotne jest opracowanie modelu matematycznego obiektu i symulowanie procesu już na etapie projektowania instalacji. W przypadku częściowej lub całkowitej utraty kontroli nad rozważanym tu procesem powstaje ryzyko wielu bardzo poważnych zagrożeń dla ludzi, mienia i środowiska naturalnego. W związku ze specyfiką procesu zagrożenia mogą wystąpić w sposób nagły, niekiedy nieprzewidywalny. Nie dość szybka regulacja bądź dobranie nieodpowiednich urządzeń może mieć bardzo poważne skutki dla bezpieczeństwa. Z powyższych przyczyn zdecydowano się na opracowanie modelu matematycznego obiektu oraz jego badanie.

Modelowanie procesu i symulowanie mogących wystąpić sytuacji pozwala na dobór odpowiedniej regulacji oraz ewentualne zmiany w projekcie. Dzięki temu znacząco obniża się ryzyko popełnienia błędów i wystąpienia sytuacji niebezpiecznych podczas eksploatacji instalacji. Oprócz wymienionych wyżej korzyści, również w przypadku wielu innych procesów, modelowanie oraz symulacja, może przynieść znaczne oszczędności. Unika się kosztownego i nierzadko czasochłonnego badania pracy układu regulacji i strojenia regulatorów na obiekcie fizycznym, którego efekty i tak często nie są zadowalające.

1.1. Założenia

Celem procesu technologicznego jest doprowadzenie wydobywanego gazu do ściśle określonych parametrów sieci przesyłowej, a więc odpowiedniego ciśnienia (60–65 bar), temperatury (10 °C), dopuszczalnego zawilgocenia oraz dopuszczalnego poziomu zanieczyszczenia.

Wydobywany gaz jest zanieczyszczony. Znajdują się w nim przede wszystkim: para wodna, zanieczyszczenia stałe oraz zanieczyszczenia chemiczne. Oczyszczanie i osuszanie gazu jest złożonym, kilkuetapowym procesem wymagającym rozbudowanej instalacji technologicznej – w zależności od rodzaju i ilości występujących zanieczyszczeń.

W niniejszym opracowaniu autorzy przedstawiają najistotniejsze zagadnienia związane z technologią wydobycia i wstępnego przygotowania gazu ziemnego. Opracowanie dotyczy jedynie pierwszego etapu procesu oczyszczania i osuszania gazu, zwanego separacją i redukcją ciśnienia. Etap ten obejmuje redukcję ciśnienia, regulację temperatury, regulację przepływu oraz wstępne osuszanie i oczyszczanie gazu poprzez zastosowanie separatorów.

Przedstawiony opis procesu technologicznego nie jest opisem rzeczywistego procesu ani rzeczywistej, fizycznie istniejącej instalacji technologicznej, ale procesem przykładowym. Kolejne etapy procesu wydobycia i wstępnego przygotowania gazu, oraz budowa instalacji technologicznej zostały dobrane do założonych warunków złożowych. Założenia te przyjęto na podstawie literatury tematycznej [1–4] oraz wiedzy branżowej autorów.

W złożu na głębokości 3500 m ciśnienie gazu wynosi około 360 bar. Z powierzchni terenu do złoża (poprzez wykonany odwiert) doprowadzone są rury wydobywcze. Na powierzchni terenu rury eksploatacyjne połączone są z głowicą eksploatacyjną odwiertu, która zapewnia wydobycie gazu.

Głowica wyposażona jest w zestaw zasuw i stanowi zabezpieczenie przed niekontrolowanym wypływem gazu z odwiertu. Jest także wyposażona w zestaw króćców pozwalających na pomiar ciśnienia w złożu i w przestrzeniach międzyrurkowych. Na potrzeby tego opracowania przyjęto, że ciśnienie na głowicy odwiertu wynosi 300 bar, a temperatura ruchowa 20 °C. Dozwolony przepływ z odwiertu wynosi 5000 m³/h.

W czasie eksploatacji nie można dopuszczać do znaczącego i długotrwałego przekroczenia przepływu dozwolonego, gdyż może to doprowadzić do uszkodzenia struktury złoża i uniemożliwić jego dalszą eksploatację.

1.2. Cele pracy

Pierwszym celem autorów było, aby dla założonych danych złożowych (ciśnienie, temperatura, maksymalny dozwolony przepływ) opisać przebieg procesu technologicznego.

Następnym zadaniem było dobranie odpowiednich rozwiązań technologicznych spośród rozwiązań powszechnie stosowanych w gazownictwie, w instalacjach wydobycia gazu ziemnego, redukcji ciśnienia, separacji wody złożowej i oczyszczania gazu – bazując na literaturze tematycznej oraz wiedzy branżowej. W szczególności należało dobrać aparaturę pomiarową i wykonawczą o odpowiednich parametrach, zgodnych z realiami procesu technologicznego, spośród oferty wiodących producentów.

Ostatni zrealizowany cel to wykonanie na podstawie literatury tematu modelu matematycznego instalacji oraz przeprowadzenie podstawowych badań symulacyjnych.

Podczas projektowania instalacji należy dobierać urządzenia i rozwiązania zapewniające odpowiedni poziom bezpieczeństwa, ponieważ metan jest gazem palnym oraz tworzy z powietrzem mieszaniny wybuchowe. Dolna granica wybuchowości wynosi 4,9 %, a górna – 15,4 %. W przypadku nieszczelności instalacji technologicznej istnieje duże ryzyko powstania mieszaniny wybuchowej. Z tego względu wszystkie przewidziane urządzenia muszą być urządzeniami wykonanymi w budowie przeciwybuchowej oraz iskrobezpiecznej, posiadającymi odpowiednie certyfikaty wymagane prawem europejskim i określone w dyrektywie ATEX [5] oraz zharmonizowanej z nią Polskiej Normie [6]. Również każdy obwód elektryczny znajdujący się w strefie zagrożenia wybuchem musi być obwodem iskrobezpiecznym. Analizę poziomu bezpieczeństwa i ryzyka tolerowanego można przeprowadzić jedną z metod polecanych normie [7].

2. Opis instalacji wydobycia gazu

W niniejszym punkcie przedstawiono przebieg procesu, opisując przy tym urządzenia i instalację technologiczną. Na rysunku 1 przedstawiono ogólny schemat przebiegu procesu.

2.1. Rurociąg głowicowy

Zwykle w instalacjach wydobywczych głowica jest połączona z instalacją dawkowania inhibitora hydratów (metanol) oraz z instalacją dawkowania inhibitora korozji. Na głowicę dozowany jest metanol, który zapobiega tworzeniu się hydratów w rurach wydobywczych, głowicy, w rurociągu głowicowym oraz we fragmencie instalacji separacji i redukcji ciśnienia – aż do pierwszego separatora. Do głowicy wtłaczany jest również inhibitor korozji, który zabezpiecza rurociąg głowicowy oraz ww. fragment instalacji przed korozją.

Od głowicy eksploatacyjnej do instalacji technologicznej separacji i redukcji ciśnienia poprowadzony jest rurociąg DN 80 (80 mm średnicy) zwany rurociągiem głowicowym, którego długość wynosi 50 m. Rurociąg ten wyposażony jest w automatyczny zawór szybkozamykający, który

odcina dopływ gazu z odwiertu w przypadku osiągnięcia krytycznej wartości któregoś z podstawowych parametrów procesu technologicznego.

2.2. Zawór redukcyjny

Po przejściu przez rurociąg głowicowy następuje redukcja ciśnienia na zaworze redukcyjno-regulacyjnym PV-100 z 300 bar do 180 bar. Z czasem ciśnienie przed zaworem redukcyjnym jest coraz niższe w wyniku stopniowego wyczerpywania złoża i redukcja ciśnienia jest coraz mniejsza. Stopień otwarcia tego zaworu ma również bezpośredni wpływ na wartość przepływu gazu. Zawór PV-100 jest wyposażony w zestaw zasuw oraz rurociąg *bypassowy* ze zwężką redukcyjną, co w przypadku awarii umożliwia wyłączenie go z pracy i puszczanie gazu rurociągiem omijającym bez przerywania pracy instalacji. Zawór PV-100 stanowi także dodatkowe zabezpieczenie w przypadku wystąpienia zdarzeń awaryjnych, określonych w tabeli blokad. Wtedy stopień otwarcia zaworu zostanie określony przez sterownik na 0 %.

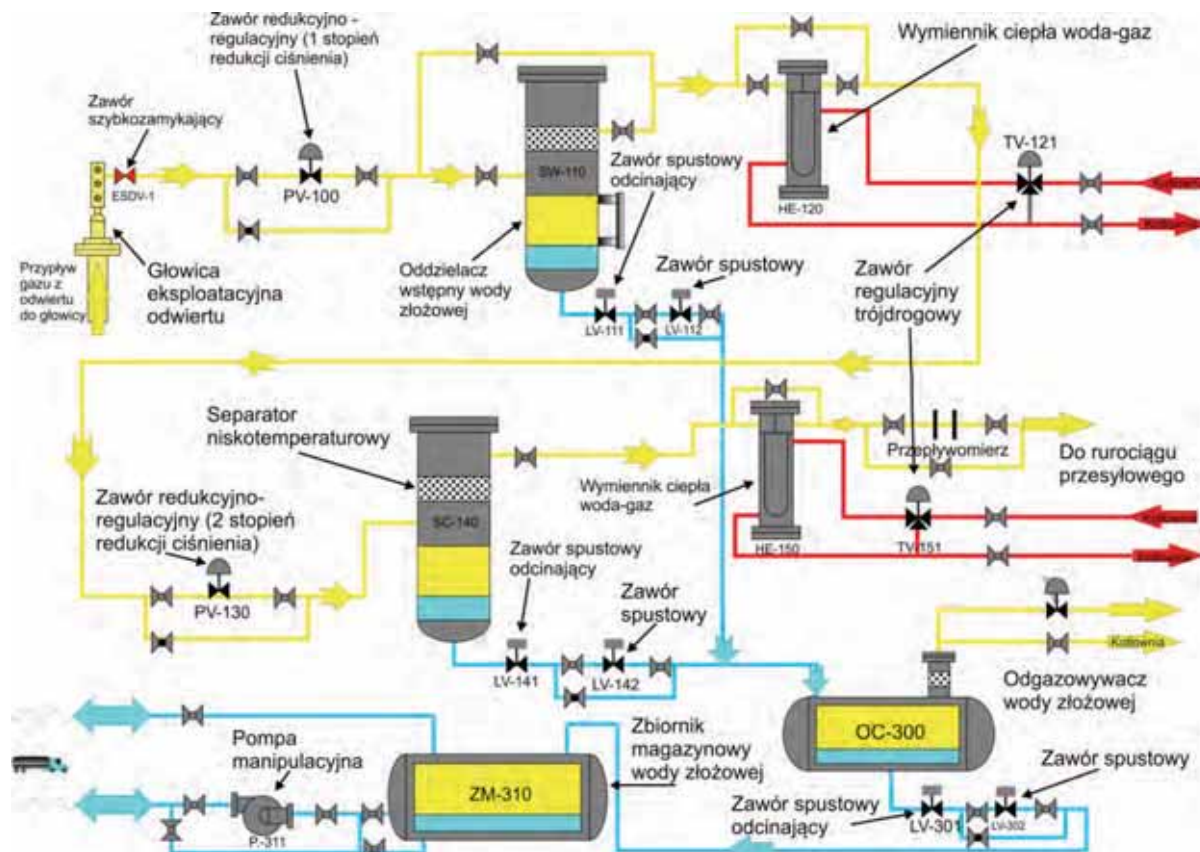
2.3. Separator

Za zaworem redukcyjnym znajduje się separator wstępny wody złożowej SW-110. Jest on również wyposażony w zestaw zasuw oraz rurociąg omijający. W separatorze następuje wydzielenie wody złożowej z gazu poprzez nagłą zmianę kierunku przepływu gazu, a także oddzielenie części zanieczyszczeń.

Woda złożowa zbierająca się na dnie separatora jest okresowo spuszczana przez automatyczny układ spustowy do odgazowywacza cieczy złożowej OC-300, a stamtąd do zbiornika magazynowego ZM-310. Układ spustowy składa się z dwóch zaworów automatycznych typu otwarty-zamknięty: spustowego LV-112 oraz odcinającego LV-111. Zawór spustowy otwiera się, gdy poziom wody w separatorze SW-110 przekroczy górny próg i odpuszcza określoną ilość wody z separatora do odgazowywacza OC-300. Zawór odcinający natomiast jest w normalnych warunkach otwarty, a zamyka się w przypadku spadku poziomu wody w separatorze poniżej dolnego krytycznego progu. Stanowi on zabezpieczenie przed całkowitym opróżnieniem separatora i przedostaniem się gazu pod wysokim ciśnieniem do niskociśnieniowej instalacji odgazowywacza cieczy złożowej OC-300, zabezpieczając ją przed zniszczeniem (np. w przypadku nieprawidłowej pracy zaworu spustowego LV-112, lub nieprawidłowych wskazań aparatury kontrolno-pomiarowej lub błędów użytkownika). Zawór odcinający LV-111 jest sterowany sygnałem z niezależnej sondy niskiego poziomu. Zawór spustowy LV-112 posiada obejście umożliwiające odpuszczanie wody złożowej przez obsługę przy użyciu zaworu ręcznego.

2.4. Wymiennik ciepła

Za separatorem wstępnym SW-110 znajduje się wymiennik ciepła woda-gaz HE-120. Również w tym miejscu, w rurociągu łączącym separator i wymiennik dawkowany jest metanol oraz inhibitor korozji w celu ochrony dalszej części instalacji (aż do separatora niskotemperaturowego SC-140). Wymiennik ciepła HE-120 (podobnie jak separa-



Rys. 1. Schemat instalacji technologicznej

Fig. 1. Diagram of process plant

tor SW-110) jest wyposażony w zestaw zaworów oraz rurociąg omijający. W wymienniku następuje wymiana ciepła między płynącym przez niego gazem, a medium grzewczym (roztwór wody w glikolu o temperaturze ok. 90 °C) dostarczanym do wymiennika z kotłowni. Zadaniem wymiennika jest podgrzanie gazu do zadanej przez użytkownika temperatury. W tym celu za pomocą zaworu regulacyjnego trójdrogowego TV-121 reguluje się ilość doprowadzanego do wymiennika medium grzewczego. Temperatura gazu za pierwszym stopniem redukcji może ulegać wahaniom w zależności od natężenia przepływu, etapu eksploatacji (stopień szczerpania złoża) oraz od temperatury na zewnątrz, ponieważ instalacja wymienia ciepło również z otoczeniem. Wymiennik HE-120 jest niezbędny dla utrzymania odpowiedniej temperatury w różnych warunkach eksploatacji.

2.5. Zawór redukcyjno-regulacyjny PV-130

Po przejściu przez wymiennik HE-120 gaz kierowany jest na drugi stopień redukcji ciśnienia i separacji.

Na zaworze redukcyjno-regulacyjnym PV-130 następuje redukcja ciśnienia z 180 bar do 65 bar. Stopień otwarcia tego zaworu ma również bezpośredni wpływ na wartość przepływu gazu. Zawór PV-130 jest, podobnie jak PV-100, wyposażony w zestaw zasuw oraz rurociąg omijający ze zwięźką redukcyjną. Temperatura gazu za drugim stopniem redukcji powinna wynosić około -5 °C, by zapewnić odpowiednią jakość separacji w separatorze niskotemperaturowym SC-140. Temperaturę taką można utrzymywać poprzez odpowiednią regulację ilości medium grzewczego

dostarczanego do wymiennika HE-120 zaworem trójdrogowym TV-121.

2.6. Separator niskotemperaturowy

Za zaworem redukcyjnym PV-130 znajduje się separator niskotemperaturowy wody złożowej SC-140. W filtr separatora dawkowany jest metanol w celu zabezpieczenia dalszej części instalacji przed tworzeniem się hydratów. Separator SC-140 podobnie jak SW-110 jest wyposażony w zestaw zasuw oraz rurociąg omijający. W separatorze następuje wydzielenie z gazu wody złożowej i zanieczyszczeń dzięki *wymrożeniu* (temperatura za drugim stopniem redukcji wynosi około -5 °C) oraz dzięki nagłej zmianie kierunku przepływu gazu. Woda złożowa zbierająca się na dnie separatora jest okresowo spuszczana przez automatyczny układ spustowy (taki jak przy separatorze SW-110) do odgazowywacza cieczy złożowej OC-300, a stamtąd do zbiornika magazynowego ZM-310. Układ spustowy składa się z dwóch zaworów automatycznych typu otwarty-zamknięty – spustowego LV-142 i odcinającego LV-141 oraz obejścia.

2.7. Wymiennik ciepła woda-gaz HE-150

Za separatorem wstępnym SC-140 znajduje się wymiennik ciepła woda-gaz HE-150. W rurociąg łączący separator i wymiennik dawkowany jest inhibitor korozji w celu ochrony dalszej części instalacji przed korozją. Wymiennik HE-150 ma podobną budowę jak HE-120 i również jest wyposażony w zestaw zaworów oraz rurociąg omijający. W celu regulacji temperatury gazu, za pomocą zaworu

regulacyjnego trójdrogowego TV-151 reguluje się ilość doprowadzanego z kotłowni do wymiennika medium grzewczego. Temperatura gazu po przejściu przez wymiennik powinna wynosić około 10 °C. Gaz o takiej temperaturze przesyłany jest rurociągiem do instalacji kolejnych etapów oczyszczania.

2.8. Odcinek pomiarowy

Po przejściu przez instalację redukcji ciśnienia i separacji następuje pomiar przepływu gazu. W tym miejscu zainstalowany jest przepływomierz oraz przetworniki ciśnienia i temperatury. Układ pomiarowy wyposażony jest w zestaw zaworów oraz rurociąg umożliwiający ominięcie tego odcinka.

2.9. Odgazowywacz wody złożowej wraz z układem spustowym

Woda spuszczana z separatorów SW-110 oraz SC-140 zawiera w sobie węglowodory i trafia do odgazowywacza wody złożowej OC-300. Tutaj w wyniku *odstania* następuje rozdzielanie wody i węglowodorów, które są transportowane rurociągiem do kotłowni technologicznej i stanowią gaz opałowy. Nadmiar wydzielanego gazu jest odprowadzany automatycznym zaworem na zrzut gazu. Woda złożowa natomiast, po przekroczeniu określonego progu poziomu w odgazowywaczu, jest spuszczana przez automatyczny układ spustowy (taki jak w przypadku separatorów SW-110 i SC-140) do zbiornika magazynowego ZM-310. Układ spustowy odgazowywacza OC-300 składa się z dwóch zaworów automatycznych typu otwarty-zamknięty: spustowego LV-302 i odcinającego LV-301 oraz obejścia.

2.10. Zbiornik magazynowy wody złożowej wraz z pompą manipulacyjną

Odgazowana woda złożowa trafia do zbiornika magazynowego wody złożowej ZM 310, skąd jest okresowo odbierana za pomocą autocysterny celem dalszego składowania. Do przetłaczania wody złożowej służy pompa manipulacyjna P-311. W przypadku awarii pompy P-311 można posłużyć się pompą zainstalowaną na autocysternie i otworzyć rurociąg *bypassowy*.

3. Dobór urządzeń

W poniższym rozdziale przedstawiono niezbędne zagadnienia z zakresu mechaniki płynów i gazów. Przedstawiono również zasady doboru niektórych urządzeń wykonawczych oraz dokonano niezbędnych dla doboru obliczeń.

3.1. Dobór zaworu redukcyjno-regulacyjnego PV-100

Wartość przepływu gazu płynącego przez zawór redukcyjny jest zależna od ciśnienia przed zaworem, ciśnienia za zaworem, gęstości gazu oraz współczynnika przepływu Kv . Współczynnik przepływu Kv definiowany jest jako wartość przepływu wyrażona w m^3/h przy spadku ciśnienia na zaworze o 1 bar [8]. Współczynnik przepływu Kv jest zależny od stopnia otwarcia zaworu i jest określony w tabelach lub charakterystykach dostarczanych przez

producentów zaworów. Jest to podstawowy i bardzo istotny parametr przy doborze zaworu do instalacji technologicznej.

Na podstawie przyjętych danych dotyczących instalacji technologicznej obliczono wymagany współczynnik Kv oraz wybrano odpowiedni zawór spośród oferty wiodących producentów zaworów regulacyjnych dla gazownictwa.

Jeśli zachodzi:

$$\Delta p < \frac{p1}{2} \quad (1)$$

to wówczas mamy przepływ podkrytyczny, a wymagany współczynnik przepływu obliczamy ze wzoru [9]:

$$Kv = \frac{Vn}{514} \sqrt{\frac{\rho n(t1+273)}{\Delta p \cdot p2}} \quad (2)$$

Jeśli natomiast zachodzi:

$$\Delta p > \frac{p1}{2} \quad (3)$$

to wówczas występuje przepływ nadkrytyczny, a wymagany współczynnik przepływu oblicza się ze wzoru [9]:

$$Kv = \frac{Vn}{257 \cdot p1} \sqrt{\rho n(t1 + 273)} \quad (4)$$

gdzie:

Kv – współczynnik przepływu [m^3/h],

ρn – gęstość (przy ciśnieniu 1 bar) [kg/m^3],

$t1$ – temperatura przed zaworem [$^{\circ}C$],

$p1$ – ciśnienie przed zaworem [bar],

$p2$ – ciśnienie za zaworem [bar],

Δp – różnica ciśnień $p1 - p2$ [bar],

Vn to wartość przepływu gazu wyrażona w nominalnych metrach sześciennych [m^3/h], czyli jest to ilość gazu określona dla ciśnienia atmosferycznego i temperatury 0 °C.

Ponieważ w warunkach normalnej pracy ciśnienie $p2$ wynosi około 180 bar, a ciśnienie $p1$ wynosi 300 bar, mamy do czynienia z przepływem podkrytycznym i wartość współczynnika Kv obliczamy z wzoru (2), podstawiając wartości $p1 = 300$ bar, $p2 = 180$ bar, $\Delta p = 120$ bar, $Vn = 5000$ m^3/h , $t1 = 20$ °C, oraz $\rho n \cong 0,7$ kg/m^3 [7]. Otrzymana wartość to $Kv \cong 0,948$ m^3/h .

Dodatkowo przyjmuje się, że minimalny współczynnik przepływu zaworu musi być o 30 % wyższy od obliczonego powyżej [9], zatem:

$$Kvs = Kv \times 1,3 \cong 1,23 \frac{m^3}{h} \quad (5)$$

Należy także wziąć pod uwagę, że podczas wieloletniej eksploatacji ciśnienie $p1$ będzie stopniowo się obniżać, zatem współczynnik Kv konieczny do osiągnięcia przepływu dozwolonego Vn będzie jeszcze większy. Dla $p1 = 200$ bar (spadek ciśnienia w złożu o 100 bar) i $p2 = 180$ bar wymagane obniżenie wartości ciśnienia wynosi tylko $\Delta p = 20$ bar. Wtedy $Kvs \cong 2,26$ m^3/h .

Uwzględniając powyższe wybrano zawór regulacyjny Series 9000 1" ANSI 2500, firmy JFlow Controls, z dedykowanym dla niego ustawnikiem pneumatycznym. Współczynnik przepływu tego zaworu przy otwarciu 100 % wynosi 3,5 m^3/h [10]. Posiadamy więc odpowiedni zapas wartości współczynnika przepływu, dla późniejszej eksploatacji. Jest to zawór dedykowany dla gazownictwa o dopuszczalnym ciśnieniu roboczym do 420 bar [10] oraz pozostałych parametrach również spełniających wymagania przewidzianego miejsca instalacji.

3.2. Dobór zaworu trójdrogowego TV-121

W celu doboru odpowiedniego zaworu obliczono minimalny wymagany współczynnik przepływu. Dla cieczy współczynnik przepływu przez zawór redukcyjny wyraża się wzorem [9]:

$$Kv = V * \sqrt{\frac{\rho}{1000 * \Delta p}} \quad (6)$$

gdzie:

Kv – współczynnik przepływu [m^3/h],

V – natężenie przepływu [m^3/h],

ρ – gęstość cieczy przy ciśnieniu 1 bar [kg/m^3],

Δp – różnica ciśnień [bar].

Zakładane ciśnienie w sieci grzewczej wynosi 200 kPa = 2 bar na wejściu i 150 kPa = 1,5 bar na wyjściu. Zatem $\Delta p = 0,5$ bar. Jako ciecz grzewczą przyjęto powszechnie stosowany w kotłowniach wodnych płyn Ergolid Eko, którego gęstość wynosi w przybliżeniu 1000 kg/m^3 . Wartość przepływu medium grzewczego została określona na podstawie ilości ciepła, które medium musi przekazać gazowi płynącemu przez wymiennik. Ilość ciepła w jednostce czasu (godzina) wyraża się wzorem:

$$C = Vn_{gaz} * Cw_{gaz} * \Delta t_{gaz} \left[\frac{J}{h} \right] \quad (7)$$

gdzie:

Cw_{gaz} – ciepło właściwe gazu [$J/mol * K$],

Δt_{gaz} – przyrost temperatury gazu [K],

Vn_{gaz} – wartość przepływu gazu [mol/h].

Maksymalna dozwolona wartość przepływu gazu wynosi:

$$Vn_{gaz} = \frac{p * Vn}{R * T} = \frac{100kPa * 5000 \frac{m^3}{h}}{8,31 \frac{J}{mol * K} * 273K} \cong \cong 44,08 \frac{mol}{m^3} * 5000 \frac{m^3}{h} \cong 223214 \frac{mol}{h} \quad (8)$$

Skorzystano tu z równania Clapeyrona [11]:

$$p * Q = n * R * T \quad (9)$$

gdzie:

p – ciśnienie gazu [Pa],

Q – objętość naczynia z gazem [m^3],

n – liczba moli gazu w naczyniu,

T – temperatura gazu [K],

R – uniwersalna stała gazowa $R = 8,314$ [$J/(mol * K)$].

Ciepło właściwe metanu dla ciśnienia 180 bar wynosi [12]: $Cw_{gaz} \cong 29,5$ [$J/(mol * K)$]. Założono, że wymiennik ma mieć możliwość podniesienia temperatury gazu o $\Delta t_{gaz} = 30$ °C. Podstawiając powyższe wartości do wzoru (7) otrzymano:

$$C = 223214 \frac{mol}{h} * 29,5 \frac{J}{mol * K} * 30 K \cong 197 \left[\frac{MJ}{h} \right] \quad (10)$$

Ilość medium grzewczego koniecznego, by w jednostce czasu dostarczyć obliczoną powyżej ilość ciepła otrzymano korzystając z wzoru (7) oraz przekształcając go do postaci:

$$V_{gl} = \frac{C}{Cw_{gl} * \Delta t_{gl}} \quad (11)$$

i wykorzystując tym razem dla cieczy,

gdzie:

C – ilość ciepła [J/h],

V_{gl} – przepływ medium grzewczego (glikolu) [m^3/h],

Cw_{gl} – ciepło właściwe medium grzewczego [$J/kg * K$],

Δt_{gl} – spadek temperatury glikolu w wymienniku [K].

Ciepło właściwe płynu Ergolid Eko wynosi 3,17 $kJ/(kg * K)$, co przy gęstości w przybliżeniu 1000 kg/m^3 daje:

$$Cw_{gl} \cong 3,17 \frac{kJ}{kg * K} * 1000 \frac{kg}{m^3} = 3,17 \frac{MJ}{m^3 * K} \quad (12)$$

Spadek temperatury medium grzewczego w wymienniku powinien wynosić nie więcej niż $\Delta t_{gl} = 20$ °C = 20 K. Podstawiając powyższe wartości do wzoru (11) otrzymano:

$$V_{gl} = \frac{197 * 10^6 \frac{J}{h}}{3,17 * 10^6 \frac{J}{m^3 * K} * 20 K} \cong 3,11 \left[\frac{m^3}{h} \right] \quad (13)$$

Mając już minimalną wartość przepływu glikolu spełniającą stawiane wymagania, korzysta się z równania (6) w celu wyznaczenia współczynnika przepływu zaworu trójdrogowego:

$$Kv = 3,11 * \sqrt{\frac{1000}{1000 * 0,5}} \cong 4,4 \left[\frac{m^3}{h} \right] \quad (14)$$

Dodatkowo przyjmuje się, że minimalny współczynnik przepływu zaworu musi być o 30 % wyższy od obliczonego powyżej [9], zatem ostatecznie:

$$Kvs = Kv * 1,3 \cong 5,72 \left[\frac{m^3}{h} \right] \quad (15)$$

Uwzględniając powyższe wybrano zawór regulacyjny trójdrogowy Series 3500 1" ANSI 150, firmy JFlow Controls, którego współczynnik przepływu przy otwarciu 100 % wynosi 9 m^3/h [10]. Posiadamy więc odpowiedni zapas wartości współczynnika przepływu. Jest to zawór dedykowany dla gazownictwa o dopuszczalnych ciśnieniach roboczych do 20 bar [10] oraz pozostałych parametrach również spełniających wymagania przewidzianego miejsca instalacji.

Podobne obliczenia wykonano dla elementów drugiego stopnia instalacji: PV 130 oraz TV 151 i wybrano takie same zawory.

4. Wyprowadzenie równań dla modelu matematycznego

W niniejszym rozdziale wyprowadzono równania opisujące przebieg wybranych etapów procesu technologicznego.

4.1. Redukcja ciśnienia na zaworze PV-100

Na zaworze redukcyjnym PV-100 następuje redukcja ciśnienia oraz jednocześnie spadek temperatury gazu. Spadek temperatury przy spadku ciśnienia o 1 bar dla danego gazu określa współczynnik Joula-Thompsona [12]. Wartość tego współczynnika jest zależna przede wszystkim od wartości ciśnienia, a także w mniejszym stopniu od temperatury. W zakresie ciśnień, w którym działa zawór, różnice są znaczne: np. przy temperaturze 20 °C dla metanu, dla ciśnienia 300 bar współczynnik Joula-Thompsona wynosi $C_{jt} = 0,057308$ K/bar [12], a dla ciśnienia 180 bar wynosi już $C_{jt} = 0,18842$ K/bar [12]. W modelu symulacyjnym bieżąca wartość współczynnika Joula-Thompsona będzie odczytywana z tabeli na podstawie bieżącej wartości ciśnienia. Wartość temperatury $t2$ po redukcji ciśnienia wyraża równanie:

$$t2 = t1 - (p1 - p2) * C_{jt} \quad (16)$$

gdzie C_{jt} to wartość współczynnika Joula-Thompsona dla ciśnienia $p1$ przed zaworem.

Wartość ciśnienia $p2$ za zaworem wyznacza się korzystając z równania Clapeyrona (9) przy założeniu, że znana jest kubatura przestrzeni za zaworem, którą wypełnia gaz. Objętość gazu $Q2$ pomiędzy zaworami PV100 i PV130 określa równanie:

$$Q2 = Qods + Qwc + Qr - Qw2 \cong 0,49 - Qw2[m^3] \quad (17)$$

gdzie:

$Qods$ – objętość wewnętrzna separatora wstępnego SW-110,

Qwc – objętość wymiennika ciepła,

Qr – objętość wewnętrzna rur połączeniowych,

$Qw2$ – objętość wody zebranej na dnie separatora, która jest zmienna w czasie.

Aby obliczyć ciśnienie panujące w przestrzeni pomiędzy stopniami redukcji korzystając z wzoru (9), należy znać również liczbę moli gazu $n2$ w tej przestrzeni. Wartość tę oblicza się w sposób rekurencyjny:

$$n2_{t+1} = n2_t + \frac{\frac{(v2_t - v3_t) \frac{m^3}{h}}{3600 \frac{s}{h}} * 44,08 \frac{mol}{m^3}}{f_{próbkowania} \frac{1}{s}} \quad (18)$$

gdzie $V2$ i $V3$ to odpowiednio ilość gazu wpływającego i wypływającego z rozważanej przestrzeni. Ostatecznie podstawiając do równania (9) otrzymuje się wartość ciśnienia w rozważanej przestrzeni: wyrażoną w barach:

$$p2 = \frac{R \frac{J}{mol \cdot K}}{10^5 \frac{Pa}{bar} * (0,49 - Qw2)m^3} * n2mol * (t2 + 273,15)K \quad (19)$$

Przekształcając odpowiednio wyrażenie (2), otrzymuje się równanie określające natężenie przepływu gazu przez zawór PV100:

$$V2 = Kv * \frac{514}{\sqrt{\rho n(t1+273)}} * \sqrt{(p1 - p2) * p2} \quad (20)$$

Temperatura $t1$ gazu przed zaworem, zgodnie z wcześniejszymi założeniami wynosi 20 °C. Aktualna wartość współczynnika Kv będzie odczytywana z tabeli na podstawie bieżącej wartości stopnia otwarcia zaworu redukcyjno-regulacyjnego, a procentową wartość stopnia otwarcia zaworu zadawać będzie układ regulacji.

Ilość wody złożowej, która w każdej kolejnej chwili zbiera się na dnie separatora jest obliczana na podstawie przepływu V , wartości wykładnika wodnego oraz współczynnika jakości separacji. Wykładnik wodny określa ilość wody złożowej zawartej w metrze sześciennym gazu ziemnego. Współczynnik jakości separacji to liczba z zakresu 0÷1, określająca, jaka część wody złożowej wydzieliła się w oddzielaczu. Ilość wody $Qw2$ w separatorze można określić w następujący sposób:

$$Qw2 = Qo2 - Qs2 \quad (21)$$

gdzie:

$Qo2$ – ilość wody wydzielonej z gazu,

$Qs2$ – ilość wody spuszczonej układem spustowym.

Ilość wody odseparowanej z gazu $Qo2$ wyraża się wzorem:

$$Qo2 = \int \frac{V2}{3600 \frac{s}{h}} * ww2 * wjs2 dt \quad (22)$$

gdzie:

$ww2$ – wykładnik wodny,

$wjs2$ – współczynnik jakości separacji w separatorze,

$V2$ – natężenie przepływu gazu przez zawór PV100.

Wypuszczenie wody złożowej z separatora SW110 następuje wyłącznie w chwilach, gdy zawór spustowy jest otwarty. Ilość wody spuszczonej układem spustowym oznacza się przez $Qs2$ i wyraża się wzorem:

$$Qs2 = \int p2 * wwy dt \quad (23)$$

gdzie $wwy = 0,00002$ to przyjęty współczynnik wypływu. W modelu przyjęto, że zawór spustowy otwiera się gdy poziom wody w separatorze przekroczy próg 400 mm

i zamyka się gdy poziom wody w separatorze spadnie poniżej 250 mm. W modelu poziom wody w separatorze oblicza się dzieląc objętość wody $Q2$ przez pole podstawy zbiornika.

4.2. Wymiennik ciepła HE-120

W wymienniku następuje wymiana ciepła między płynącym przez niego gazem, a medium grzewczym – roztworem wody w glikolu, dostarczanym do wymiennika z kotłowni [2]. Ilość doprowadzanego do wymiennika medium grzewczego reguluje się za pomocą zaworu regulacyjnego trójdrogowego TV-121.

Jedyny parametr wydobywanego gazu, ulegający zmianie na tym etapie procesu technologicznego to temperatura:

$$t3 = t2 + \Delta t2 \quad (24)$$

gdzie $t2$ to temperatura gazu przed wymiennikiem, $\Delta t2$ to wzrost temperatury gazu po przejściu przez wymiennik. Aby uwzględnić bezwładność termiczną w modelu, tak obliczoną temperaturę $t3$ podaje się na człon inercyjny.

Wartość $\Delta t2$ można określić korzystając z definicji ciepła właściwego, na podstawie ilości ciepła przekazanego w wymienniku C , ilości ogrzewanego gazu Qg i ciepła właściwego gazu Cwg :

$$\Delta t2 = \frac{C}{Qg * Cwg} \quad (25)$$

Aby wyznaczyć przekazane ciepło C , należy uwzględnić współczynnik przenikalności cieplnej U , średnią różnicę temperatur pomiędzy medium grzewczym (glikolem) i gazem Δt_{glg} oraz pole powierzchni wymiany ciepła A :

$$C = U * \Delta t_{glg} * A \quad (26)$$

Wartość A oblicza się na podstawie budowy wewnętrznej wymiennika. Wewnątrz wymiennika znajduje się 50 rurek o średnicy zewnętrznej 40 mm i długości 2 m. Zatem powierzchnia wymiany cieplnej wynosi:

$$A = \pi * 0,04m * 2m * 50szt \cong 12,6m^2 \quad (27)$$

Średnią różnicę temperatur pomiędzy medium grzewczym i gazem Δt_{glg} oblicza się jako różnicę średniej temperatury gazu w wymienniku i średniej temperatury glikolu:

$$\Delta t_{glg} = \frac{90^\circ C + (90^\circ C - \Delta t_{gl})}{2} - \frac{t2 + t2 + \Delta t2}{2} \quad (28)$$

Potrzebny w równaniu (28) wzrost temperatury gazu po przejściu przez wymiennik pobiera się jako wynik obliczeń z równania (25). Zatem okazuje się, że aby wyznaczyć $\Delta t2$, trzeba dysponować wartością tego przyrostu. Jednak dzięki opóźnieniu czasowemu uzyskanemu przez wprowadzenie obiektu inercyjnego do modelu – zapobiega się powstaniu pętli algebraicznej.

Obniżenie temperatury medium grzewczego w wymienniku Δt_{gl} oblicza się tak jak $\Delta t2$ w równaniu (25), przy czym ciepło odebrane przez gaz jest równe ciepłu oddanemu przez glikol, zatem:

$$\Delta t_{gl} = \frac{U * \Delta t_{glg} * A}{Q_{gl} * C_{w_{gl}}} \quad (29)$$

Objętość glikolu Q_{gl} to jedyny nieznaną czynnik w równaniu (29). Aby to obliczyć należy skorzystać z zależności (6) i obliczyć natężenie przepływu na podstawie stopnia otwarcia zaworu:

$$V_{gl} = Kv_{gl} * \sqrt{\frac{1000 * \Delta p_{gl}}{\rho}} \quad (30)$$

a następnie obliczyć objętość przypadającą na okres próbkowania i odpowiednio przekształcić jednostki:

$$Q_{gl} m^3 = \frac{V_{gl} \frac{kg}{h}}{1000 \frac{kg}{m^3} * 3600 \frac{s}{h} * f_{próbkowania} \frac{1}{s}} \quad (31)$$

Bieżąca wartość współczynnika przepływu Kv_{gl} dla zaworu trójdrogowego TV-121 ma być odczytywana z tabeli na podstawie bieżącej wartości stopnia otwarcia zaworu trójdrogowego. Wartość stopnia otwarcia zaworu, zadaje układ regulacji temperatury gazu z regulatorem PID. Tabela została sporządzona na podstawie dokumentacji zaworu dostarczonej przez producenta zaworu.

W modelu przyjmuje się, że podgrzanie gazu w wymienniku HE-120 nie ma wpływu na wartość ciśnienia gazu przepływającego pomiędzy stopniami redukcji PV-100 i PV-130.

Modelowanie działania drugiego stopnia przygotowania gazu, a więc zaworu redukcyjnego PV-130 i wymiennika ciepła HE-150 przeprowadzono w podobny sposób jak ten przedstawiony dla pierwszego stopnia, przy czym przyjęto, że wartość ciśnienia za zaworem PV-130 jest równa wartości ciśnienia w gazociągu przesyłowym i wynosi 65 bar. W modelu wartość ta będzie stała. Jest to niewielkie uproszczenie, ponieważ gazociąg przesyłowy ma bardzo dużą objętość, dlatego zmiany ciśnienia w gazociągu przesyłowym na skutek zmiany stopnia otwarcia zaworu PV-130 są niewielkie i występują dopiero po dłuższym okresie czasu.

Wprowadzone powyżej zależności posłużyły do zbudowania schematu analogowego w programie symulacyjnym.

5. Symulacja działania instalacji

Głównym celem symulacji był dobór parametrów regulatorów PID zastosowanych w czterech miejscach instalacji: na zaworach PV-100, PV-130, TV-121, TV-151. Ważnym kryterium doboru jest uzyskanie przebiegów aperiodycznych bez przeregulowań. Za wyborem tego wskaźnika przemawiał głównie fakt, że każdy z zaworów ma żywotność określoną poprzez liczbę cykli pracy. Występowanie przebiegów periodycznych skracają zatem żywotność zaworów. Dodatkowo praca każdego z zaworów ma wpływ na płynną pracę pozostałych, gdyż poszczególne wartości parametrów (ciśnienie, temperatura, przepływ) silnie zależą od siebie. Przeregulowania i oscylacje na jednym elemencie powodują zakłócenia pracy kolejnych. Pożądane są zatem możliwie najmniejsze lub wręcz zerowe przeregulowania oraz płynna praca elementów wykonawczych.

W pierwszej kolejności zastosowano *metodę odpowiedzi skokowej* Zieglera-Nicholsa. Kompletny schemat modelu instalacji rozdzielono na moduły i dla każdego z nich oddzielnie zarejestrowano odpowiedź skokową i na jej podstawie obliczono parametry regulatora. Jednak okazało się, że parametry dobrane *metodą odpowiedzi skokowej* nie zapewniły oczekiwanej jakości regulacji, ani nawet stabilnej pracy układu w dłuższym horyzoncie czasowym. Dlatego ostatecznie parametry regulatorów dobrano doświadczalnie na podstawie prowadzonych obserwacji.

Zdecydowano przeprowadzić symulacje dla trzech istotnych sytuacji, z którymi powinien poradzić sobie układ regulacji. Spośród wielu scenariuszy występujących podczas pracy instalacji technologicznej wybrano te, które w praktyce sprawiają największe problemy układowi regulacji.

W praktyce, w większości przypadków układy regulacji nie działają poprawnie w momencie rozpoczęcia wydobycia. W związku z tym rozpoczęcie wydobycia najczęściej przeprowadza się zwiększając *ręcznie* bardzo powoli wartości otwarcia zaworów, aż do uzyskania wartości parametrów zbliżonych do zadanych. Dopiero wówczas przełącza się tryb pracy na automatyczny. Jest to rozwiązanie nieefektywne. Wymaga zaangażowania obsługi, stwarza ryzyko popełnienia błędów i przekroczenia dozwolonych parametrów oraz jest czasochłonne.

Dobranie parametrów regulatorów umożliwiających przeprowadzenie rozpoczęcia wydobycia w sposób automatyczny przez układ regulacji, zapewniając przy tym krótki czas regulacji, nieprzekraczanie wartości dozwolonych parametrów, niewielkie przeregulowania oraz nie nazbyt intensywną pracę zaworów byłoby zatem bardzo korzystne.

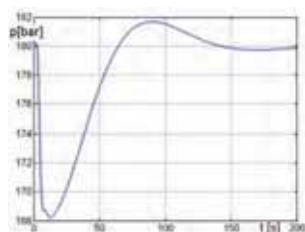
Zatem pierwsza symulowana sytuacja to rozpoczęcie wydobycia, gdy następuje stopniowe otwieranie zaworów PV-100 i PV-130. Wartości przepływów rosną od zera do wartości zadanej. Jednocześnie w związku z dużymi zmianami wartości przepływu zmieniają się wartości ciśnień. Z kolei przez zmiany wartości ciśnień następują zmiany wartości temperatur. Układ regulacji musi doprowadzić do ustalenia się wartości wszystkich parametrów w okolicy wartości zadanych, w możliwie krótkim czasie. Jednocześnie należy unikać przekraczania dozwolonych wartości parametrów, ze względu na bezpieczeństwo i uwarunkowania technologiczne. Należy także unikać zbyt częstej i zbyt intensywnej pracy zaworów, ze względu na ich żywotność.

Drugą symulowaną sytuacją było wystąpienie spustu wody złożowej z separatora w czasie normalnej pracy (ustalone wartości parametrów). Wystąpienie spustu powoduje zwiększenie się objętości pomiędzy stopniami redukcji (objętość zajmowana przez spuszczaną wodę może teraz zostać zajęta przez gaz), a przez to spadek ciśnienia w tej przestrzeni. Zmiana wartości ciśnienia wpływa na wartości temperatur oraz przepływów. Zaburzenie spustem występuje co kilka lub kilkanaście minut – w zależności od złoża i budowy instalacji.

Trzecią symulowaną sytuacją była zmiana przez obsługę kopalni zadanej wartości przepływu. Sytuacja taka ma w praktyce miejsce często – w przypadku niektórych obiektów wielokrotnie w ciągu dnia w skutek zmian w aktualnym zapotrzebowaniu odbiorców na gaz ziemny. W takiej sytuacji regulatory zaworów regulacyjnych PV-100 i PV-130 powinny dostosować stopień otwarcia tych zaworów tak, by nie dopuścić do wzrostu ciśnienia w przestrzeni pomiędzy stopniami redukcji powyżej wartości dozwolonej i jednocześnie w możliwie krótkim czasie doprowadzając wartość przepływu do nowej wartości zadanej, natomiast regulatory zaworów regulacyjnych TV-121 i TV-151 powinny dostosować stopień otwarcia tych zaworów tak by doprowadzać do wymienników ciepła

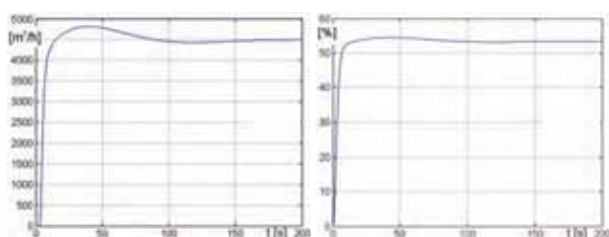
ilość medium grzewczego odpowiednią dla nowej wartości przepływu gazu.

Poniżej przedstawiono wyniki symulacji pierwszej, spośród opisanych wyżej sytuacji dla układu regulacji z parametrami regulatorów dobranymi doświadczalnie.



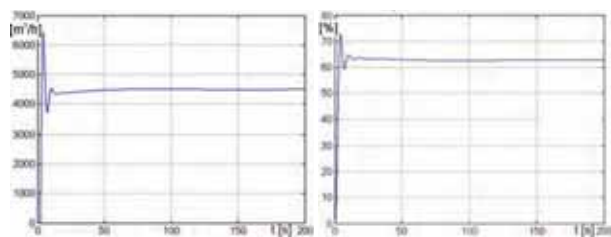
Rys. 2. Przebieg ciśnienia gazu za pierwszym stopniem redukcji – za zaworem PV-100

Fig. 2. Gas pressure after the first step of reduction – after valve PV-100



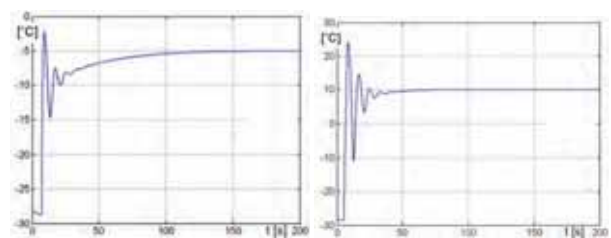
Rys. 3. Natężenie przepływu gazu za pierwszym stopniem redukcji oraz stopień otwarcia zaworu PV-100

Fig. 3. The flow rate and the percentage of the valve PV-100 opening after the first step of reduction



Rys. 4. Natężenie przepływu gazu za drugim stopniem redukcji oraz stopień otwarcia zaworu PV-130.

Fig. 4. The flow rate and the percentage of the valve PV-130 opening after the second step of reduction.



Rys. 5. Temperatura gazu za zaworem PV-130 oraz za wymiennikiem HE-150

Fig. 5. The gas temperature after the valve PV-130 and after the heat exchanger HE-150

Na rysunku 2 przedstawiono przebieg wartości ciśnienia za zaworem redukcyjnym PV-100. Amplituda oscylacji wartości ciśnienia wynosiła poniżej 10 % wartości zadanej, a oscylacja została szybko stłumiona.

Na rysunkach 3 i 4 przedstawiono wartości przepływów za 1. stopniem redukcji i za 2. stopniem redukcji. W przypadku przepływu V_2 wystąpiło przeregulowanie wartości jedynie około 7 % wartości zadanej. Oscylacja

została stłumiona w czasie około 200 sekund, co jest dobrym wynikiem – biorąc pod uwagę duże opóźnienia występujące zawsze w instalacjach technologicznych. Nie doszło tu do przekroczenia wartości dozwolonej przepływu równej 5000 m³/h. W przypadku przepływu na drugim stopniu redukcji, początkowo wystąpiło większe przeregulowanie o wartości około 40 % wartości zadanej, jednak po czasie 50 sekund amplituda oscylacji była już bardzo niewielka, a wartość przepływu bliska wartości zadanej. Przekroczenie dozwolonej wartości przepływu, równej 5000 m³/h, nastąpiło tylko jednorazowo przez czas 5 sekund, co w momencie przeprowadzania rozruchu jest akceptowalne.

Na rysunku 5 przedstawiono wartości temperatur za 2. stopniem redukcji i za wymiennikiem HE-150. W obu przypadkach wystąpiły oscylacje o dużej amplitudzie oraz przeregulowanie, jednak tylko w czasie nie przekraczającym 50 sekund. Wartości temperatur osiągały wartość zadaną po czasie mniejszym niż 200 sekund. Temperatura w przypadku omawianego procesu technologicznego nie jest parametrem o znaczeniu krytycznym – jak ma to miejsce w przypadku ciśnienia. Zatem chwilowe oscylacje nawet o dużej amplitudzie w początkowym czasie przeprowadzania rozruchu są akceptowalne.

6. Podsumowanie

W artykule opisano przebieg procesu technologicznego oraz budowę instalacji technologicznej, przedstawiono zasady doboru urządzeń wykonawczych oraz zagadnienia z zakresu mechaniki płynów i gazów, korzystając przy tym z fachowej literatury, dokonano doboru odpowiednich urządzeń wykonawczych. Na podstawie analizy literatury tematycznej wyprowadzono równania opisujące przebieg procesu technologicznego, na ich podstawie wykonano model matematyczny i przeprowadzono symulację.

W wykonanym modelu umieszczono układy regulacji z regulatorami PID. Parametry regulatorów początkowo dobrano metodą Zieglera-Nicholsa. Następnie badano zachowanie modelu w różnych zadanych warunkach. Nastawy regulatorów dobrane metodą Zieglera-Nicholsa nie zapewniały stabilnej pracy układu. Modyfikowano je zatem metodą prób i błędów aż do osiągnięcia parametrów zapewniających oczekiwaną jakość regulacji w różnych sytuacjach występujących w praktyce.

Po przeprowadzeniu dodatkowych testów poszczególnych modułów modelu okazało się, że przyczyną zdecydowanie niesatysfakcjonującej jakości regulacji przy użyciu parametrów wyznaczonych metodą odpowiedzi skokowej jest występowanie licznych zależności pomiędzy wartościami poszczególnych zmiennych, których nie uwzględniono roz dzielając model na moduły i dobierając każdy regulator osobno. Szczególnie mocno powiązana jest praca zaworów PV-100 i PV-130. Jeśli choćby jeden z regulatorów wprowadzał oscylacje lub pracował niewystarczająco szybko, to powodowało to pojawienie się znacznych wahań wartości regulowanych przez inne regulatory. W efekcie powstawały kolejne tętnienia i układ nie mógł osiągnąć stanu stabilnego. Badając każdy zawór z regulatorem z osobna i podając na niepodłączone wejścia wartości stałe, występujące w warun-

kach stabilnej pracy okazywało się, że jakość regulacji dla poszczególnych modułów była dobra.

W niniejszej pracy posługiwano się w zasadzie równaniami dla stanów statycznych. Aby zamodelować opóźnienia w instalacji, wstawiono obiekty inercyjne pomiędzy regulatorami a zaworami PV-100 oraz PV-130; również obliczone temperatury gazu za wymiennikami przechodzą przez człony inercyjne. Z pewnością dokładniejsze odwzorowanie rzeczywistości osiągnie się wychodząc od równań różniczkowych stosowanych w teorii mechaniki płynów.

Wykonany model matematyczny może być użyteczny do dalszych badań w zakresie regulacji procesów występujących w gazownictwie. Po zmodyfikowaniu pod kątem konkretnej instalacji technologicznej model może także posłużyć do przeprowadzenia doboru parametrów regulatorów dla danej instalacji, redukując w ten sposób ryzyko popełnienia błędów i powstawania sytuacji niebezpiecznych podczas eksploatacji instalacji.

Wykonana praca może też stanowić źródło praktycznej, na ogół trudnodostępnej wiedzy dla osób interesujących się problematyką branży gazowniczej.

Bibliografia

1. Molenda J., *Gaz ziemny paliwo i surowiec*, WNT, Warszawa 1993.
2. *Engineering data book*, Gas Processors Suppliers Association, Oklahoma 2004.
3. Campbell J. M., *Gas Conditioning and Processing*, Campbell Petroleum Series, Oklahoma 1984.
4. Perry R., Green D., *Perry's Chemical Engineers Handbook*, McGraw-Hill, New York 2008.
5. 94/9/EC ATEX95 Dyrektywa Rady Unii Europejskiej definiująca wymagania, jakie muszą spełniać produkty przeznaczone do stosowania w strefach zagrożonych wybuchem, wydana w 1994 r., obowiązuje od 2003 r.
6. PN-EN 60079-11:2012 Atmosfery wybuchowe – Część 11: Zabezpieczenie urządzeń za pomocą iskrobezpieczeństwa „i”.
7. PN-EN 61511-3:2009 Bezpieczeństwo funkcjonalne – Przyrządowe systemy bezpieczeństwa do sektora przemysłu procesowego – Część 3: Wytyczne do określania poziomów wymaganych nienaruszalności bezpieczeństwa..
8. [www.documentation.emersonprocess.com] – *Control valve handbook* – Fisher Controls International LLC 2005 (1 grudnia 2012).
9. [www.markenberg.de] – *Calculation of Pressure Regulators* – Markenberg (1 grudnia 2012).
10. [www.jflowcontrols.com] – *Dokumentacje zaworów* – JFlowControls (1 grudnia 2012).
11. [pl.wikipedia.org] – *Równanie Clapeyrona* (1. grudnia 2012).
12. [www.nist.gov] – *Właściwości fizyczne gazów i cieczy* – National Institute of Standards and Technology (1 grudnia 2012). ■

Model and design of installation for the process of extraction and preliminary preparation of natural gas

Abstract: In this paper we describe the subsequent steps of the process of extraction and preconditioning of natural gas. This paper discusses issues of the system design and its modeling. The choice of process equipment is presented. The paper presents the derivation of mathematical model of the process and the results of simulation are presented. At the end of the paper some conclusions are presented.

Keywords: extraction and preconditioning of natural gas, pressure reduction, system design, modeling and simulation, selection of the controller parameters

dr inż. Robert Bączyk

Jest adiunktem na Politechnice Poznańskiej. Jest również absolwentem tej Uczelni. Jego zainteresowania naukowe dotyczą m.in. teorii sterowania, układów automatyki, systemów, wizyjnych, systemów nawigacji robotów mobilnych.

e-mail: robert.baczyk@put.poznan.pl



mgr inż. Maciej Józwiak

Jest absolwentem Politechniki Poznańskiej. Jego zainteresowania naukowe dotyczą m.in. automatyki przemysłowej, teorii sterowania, programowania, technologii stosowanych w przemyśle gazowniczym i naftowym.

e-mail: maciej.jozwiak@o2.pl

