

Zagrożenia wybuchowe powodowane przez gaz wysypiskowy.

Część I.

Wstęp

Metan jest drugim pod względem ilości po dwutlenku węgla gazem cieplarnianym, powstającym na skutek działalności człowieka. Uważa się, że metan jest około 20 razy bardziej szkodliwy dla środowiska niż dwutlenek węgla. Jednym ze źródeł uwalniania się metanu są składowiska odpadów. Aktualnie metan powstający w składowiskach odpadów można w znaczny sposób zredukować traktując go jako paliwo do pozyskiwania energii w skutek spalania. Eksploatacja gazu wysypiskowego związana jest jednak z możliwością tworzenia się mieszanin wybuchowych. Właściwości wybuchowe gazu wysypiskowego są wynikiem obecności metanu, wodoru, tlenu węgla i siarkowodoru.

Składnik	ilość w %
metan CH ₄	55-75
dwutlenek węgla CO ₂	25-45
azot N ₂	0-0,3
wodór H ₂	1-5
siarkowodór H ₂ S	0-3
tlen O ₂	0,1-0,5

Tabela 1. Udział procentowy gazów wchodzących w skład gazu wysypiskowego.

gaz wysypiskowy – def. gaz palny, produkt fermentacji anaerobowej związków pochodzenia organicznego (np., odpady komunalne, odpady przemysłu rolno-spożywczego, biomasa) a częściowo także ich gnicia.

Wytwarzanie gazu wysypiskowego

Na składowiskach odpadów gaz wytwarza się samoczynnie, stąd nazwa gaz wysypiskowy. Odpady składowane na wysypisku są mieszaniną materiałów organicznych i nieorganicznych o różnej wilgotności. Jeżeli zostaną stworzone odpowiednie warunki składowania tj. ugniatanie i przykrywanie warstwy odpadów ziemią lub innym materiałem, to okres w którym podlegają one działaniu tlenu i światła jest bardzo krótki. Stwarza to warunki dla zachodzenia procesów rozkładu beztlenowego. Rozkład ten jest następstwem szeregu spontanicznie zachodzących procesów fizycznych, chemicznych i biologicznych. Średnio około 75% odpadów miejskich stanowią biodegradowalne materiały organiczne, które stanowią główne źródło gazu składającego się głównie z dwutlenku węgla i metanu w różnych proporcjach.

Po raz pierwszy wydzielanie się metanu na wysypiskach odpadów stwierdzono w 1934 roku w Wielkiej Brytanii. Pierwsze instalacje odprowadzające gaz do atmosfery zaczęły powstawać w końcu lat sześćdziesiątych. Obecnie na wysypiskach instaluje się systemy odgazowujące. Nowoczesne składowiska posiadają specjalne komory fermentacyjne lub

bioreaktory, w których fermentacja metanowa odpadów odbywa się w stałych temperaturach 33-37°C dla bakterii metanogennych mezofilnych, rzadziej 50-70°C dla bakterii termofilnych oraz przy pH 6,5-8,5 i odpowiedniej wilgotności. Ze składowiska o powierzchni około 15 ha można uzyskać 20 do 60 GWh energii w ciągu roku, jeżeli roczna masa składowanych odpadów to około 180 tys. ton. Wartość opałowa gazu wysypiskowego waha się w granicach 17-27 MJ/m³ i zależy głównie od zawartości metanu.

Zagrożenie wybuchowe.

Gęstość gazu wysypiskowego jest większa niż powietrza, co powoduje, że gromadzi się on w pobliżu ziemi i jej zagłębieniach. Gaz nie jest toksyczny i zawiera małą ilość tlenu. Główne zagrożenie gazu wysypiskowego wynika z obecności metanu, który stanowi do 75 % składu. Stężenie metanu w granicach 5 – 15%, w mieszaninie z powietrzem powoduje powstanie atmosfery wybuchowej. Pojawiające się niewielkie wybuchy prowadzą do powstawania pożarów, które na składowisku odpadów są szczególnie trudne do ugaszenia.

Zachowanie się gazu wysypiskowego zależy szczególnie od proporcji dwutlenku węgla do metanu. Stosunek ten steruje gęstością gazu i jego palnością oraz wpływa na szybkość emisji i rozpraszania wielkości określających zdolność do gromadzenia się mieszaniny palnej. Gdy metan uchodzi bezpośrednio do otwartej atmosfery istnieje niewielkie ryzyko jego wybuchu. Dzieje się tak, gdy warstwa, na której usytuowane jest wysypisko, jest przepuszczalna lub gdy posiada pasma przepuszczalne pozwalające na poziomą migrację gazu. Problem zagrożenia metanem staje się poważny, gdy gaz nie może przedostać się w sposób naturalny do atmosfery. Każda zamknięta przestrzeń, budynek lub zbiornik, może działać jako pojemnik zbiorczy gazu. Podstawowymi drogami, którymi gaz może dostać się do budynku są pęknięcia i szczeliny w podłodze lub ścianach oraz rury i przewody. Najbardziej niebezpieczne są pomieszczenia małe o słabej wymianie powietrza. Związane jest to z możliwością utrzymywania się stężeń wybuchowych przez dłuższy czas.

Klasyfikacja przestrzeni niebezpiecznych.

Klasyfikacja stref zagrożenia wybuchem dla instalacji do odzysku gazu na składowisku odpadów powinna być wykonana w początkowym etapie prac projektowych. W chwili, gdy zatwierdzono początkowe opisy linii technologicznych oraz plany zagospodarowania, istnieje możliwość wykonania oceny zagrożenia wybuchem i wyznaczenia stref. Przydatne w tym zakresie będą wytyczne ukazujące sposób podejścia do poszczególnych miejsc wydobywania i eksploatacji gazu wysypiskowego. W chwili powstania instalacji należy dokonać ewentualnych korekt w zależności od zmian parametrów użytkowania. Daje to możliwość zachowania bezpiecznych warunków pracy bezpośrednio po uruchomieniu.

W 2006 roku powstał w Anglii przemysłowy kodeks postępowania stworzony przez ESA (Environmental Services Association). Po konsultacji z Health and Safety Executive i po aprobachie przez forum Waste Industry Safety and Health (WISH), stał się wytycznymi do oceny zagrożenia wybuchem i klasyfikacji stref. Wytyczne nie są obligatoryjne, ale wskazują możliwość rozwiązania problemu wg. najbardziej właściwego sposobu dla opisywanych w artykule przestrzeni.

Równanie natężenia wypływu masy gazu wysypiskowego.

Podstawowym elementem przy określeniu rodzaju i zasięgu strefy jest obliczenie natężenia wypływu gazu wysypiskowego (kg/s). Ciśnienia występujące podczas wydobywania gazu wysypiskowego są bardzo niskie. W praktyce, wydobywanie gazu za pomocą instalacji przetwarzania odpadów polega na stworzeniu podciśnienia. Jeśli występuje gdzieś nadciśnienie, to jest ono bardzo małe w porównaniu z ciśnieniami występującymi w przemyśle.

Do obliczenia natężenia wypływu gazu wysypiskowego można posłużyć się gotowymi wzorami do obliczania natężenia wypływu gazu ziemnego. Mimo że gaz wysypiskowy nie jest tym samym, co gaz ziemny to równanie pozwala na wprowadzenie rzeczywistej masy cząsteczkowej gazu, dzięki czemu można otrzymać wystarczająco dokładną wartość natężenia wypływu. Dla ciśnienia poniżej 850 mbarg:

$$q = 1500 \cdot C_d \cdot A \cdot \left(\frac{M \cdot P}{T} \right)^{0,5} \quad \text{Równanie 1}$$

gdzie:

- q – natężenie wypływu gazu wysypiskowego w kg/s,
- C_d – współczynnik wycieku przez otwór = 0,8 (0,97 dla zaworów bezp.),
- A – powierzchnia przekroju otworu w m^2 ($1 \text{ mm}^2 = 10^{-6} \text{ m}^2$),
- M – masa cząsteczkowa = 27.2 kg/kmol dla gazu wysypiskowego zawierającego 60% metanu,
- P – ciśnienie gazu wyrażone w barach,
- T – temperatura bezwzględna gazu w K (przyjęto $10^\circ \text{C} = 283 \text{ K}$).

Dla uproszczenia przyjęto, że temperatury gazu wysypiskowego wylotowego i gazu w otoczeniu wycieku są równe i wynoszą 10°C . Znając czas wydobywania się gazu możemy obliczyć jego masę.

$$m_{\max} = q \times t \quad [\text{kg}]$$

Powierzchnia przekroju przyjęta w wytycznych dla wycieku podczas nieszczelności kołnierza, połączeń lub zaworów bazuje na wskazówkach z dokumentu IGE/SR/25 (Institution of Gas Engineers – Hazardous Area Classification of Natural Gas Installations) i wynosi 0.25 mm^2 . Założenia takie stosuje się do warunków „normalnych” co ogólnie rzecz biorąc jest poprawne ze względu na niskie ciśnienia i małe zmiany temperatury.

Równanie objętościowego natężenia wypływu gazu wysypiskowego.

Równania używane w wytycznych, stworzone zostały dzięki wykorzystaniu modelowania empirycznego odnoszącego się do zależności pomiędzy szybkością wycieku a zasięgiem strefy.

Po pierwsze konieczne jest przeliczenie natężenia przepływu masy obliczonej z równania 1 na objętościowe natężenie wypływu. Przeliczenia tego można dokonać korzystając z równania gazu doskonałego. (Ciśnienie gazu wysypiskowego jest wystarczająco niskie, aby można było używać do obliczeń równań gazu doskonałego).

$$p \times V = n \times R \times T$$

gdzie:

p – ciśnienie bezwzględne gazu w Pa, 1atm = 101325 Pa,
 V – objętość gazu w m^3 ,
 n – liczba moli = (masa w kg)/(masa cząsteczkowa w molach) = m/M (mol jest masą cząsteczkową substancji wyrażonej w gramach. Dla metanu 1 mol = 16 g. masa cząsteczkowa wyrażana jest w g/mol lub kg/kmol,
 R – stała gazowa 8314.4 J/kmol/K,
 T – temperatura w K.

Do obliczeń przyjęto ciśnienie równe 101325 Pa – zmiany ciśnienia mają bardzo niewielki wpływ na dokładność obliczeń.

A więc:

$$V = \frac{n \times R \times T}{p} = \frac{m \times R \times T}{M \times p}$$

$$V = \frac{m \times 8314,4 \times T}{M \times 101325}$$

$$V = \frac{0,0821 \times m \times T}{M}$$

$$m_{\max} = q \times t$$

Zamiana objętości do masy:

$$Q_{LG} = \frac{0,0821 \times q \times T}{M}$$

gdzie:

Q – natężenie przepływu objętości gazu wysypiskowego w m^3/s ,
 g – natężenie wypływu masy w kg/s,
 T – temperatura bezwzględna gazu w K,
 M – masa molowa = 27.2 kg/kmol dla gazu wysypiskowego (60% metanu).

t – czas wypływu (chcąc otrzymać objętość uwolnionego gazu w czasie należy pomnożyć Q_{LG} przez czas uwolnienia w [s])

Stała w równaniu (0.0821) jest pochodną stałych i parametrów gazu. Ponieważ w wytycznych przyjęto iż gaz śmietniskowy zawiera maksymalnie 60% metanu to natężenie przepływu objętości można zapisać jako:

$$Q_{CH_4} = \frac{0,0493 \times q \times T}{M} \quad \text{Równanie 2}$$

Należy zauważyć, iż w obliczeniach używa się masy molowej gazu wysypiskowego. Jeśli wynik pomnożymy przez 0.6 to otrzymamy objętościowe natężenie wypływu metanu.

Dla innych procentowych zawartości metanu w gazie wysypiskowym, wartość Q_{LG} może być wyznaczona przy użyciu mas molowych z tabeli poniżej. Mnożąc Q_{LG} przez odpowiednią wartość można otrzymać Q_{CH_4} .

Tabela 1. Wartości masy molowej w zależności od zawartości procentowej metanu						
% metanu	30	40	50	60	70	80
M (kg/kmol)	35.6	32.8	30.0	27.2	24.4	21.6

Równanie promienia strefy dla wycieków zewnętrznych

Promień strefy może być obliczony z następującego równania empirycznego:

$$X = \left(\frac{(1840 \times Q_{CH_4})}{k \times E_{\%}} \right)^{0,55} \quad \text{Równanie 3}$$

gdzie:

- x – promień strefy (przyjęto kulę) w [m],
- 1840 – stała wyprowadzona z formuły empirycznej – stała niemianowana,
- Q_{CH_4} – natężenie przepływu objętości metanu obliczone z równania 2,
- k – współczynnik bezpieczeństwa stosowany do DGW:
 - 0.5 dla wycieku drugiego stopnia,
 - 0.25 dla wycieku pierwszego stopnia,
- $E_{\%}$ - dolna granica wybuchowości w %.

Równanie to uwzględnia zakłócenia spowodowane bliskością gruntu, ścian lub innych przedmiotów. Ma ono zastosowanie **tylko dla przestrzeni zewnętrznych** gdzie przyjęta prędkość wiatru jest wystarczająca dla turbulentnego rozprzestrzeniania się wycieku. Promień strefy mierzony jest równomiernie we wszystkich kierunkach od punktu wycieku.

Przykład 1: znaleźć promień strefy dla przeciekającej kryzy.

W tym przykładzie użyto równań od 1 do 3 w celu znalezienia promienia strefy dla przeciekającej kryzy rurociągu zawierającego gaz wysypiskowy pod ciśnieniem 350 mbar i w temperaturze 10 °C.

Krok 1: użycie równania 1 do obliczenia natężenia przepływu masy, q

$$q = 1500 \cdot C_d \cdot A \cdot \left(\frac{M \cdot P}{T} \right)^{0,5}$$

gdzie:

q – natężenie przepływu gazu wysypiskowego w kg/s wskutek przecieku,
 C_d – współczynnik wycieku przez otwór = 0,8,
 A – powierzchnia przekroju otworu w $m^2 = 0,25 \text{ mm}^2$,
 M – masa cząsteczkowa = 27.2 kg/kmol dla gazu wysypiskowego,
 P – ciśnienie gazu względem atmosfery wyrażone w bar = 0,35 bar,
 T – temperatura bezwzględna gazu wylatującego z otworu w K = 283 K.

czyli:

$$q = 1500 \times 0,8 \times (0,25 \times 10^{-6}) \times \left(27,2 \times \frac{0,35}{283} \right)^{0,5} = 5,51 \times 10^{-5} \frac{kg}{s}$$

Krok 2: użycie równania 2 do przeliczenia natężenia przepływu masy na natężenie przepływu objętości, Q

$$Q_{CH_4} = \frac{0.0493 \times q \times T}{M}$$

gdzie:

Q_{CH_4} – natężenie przepływu objętości metanu w m^3/s ,
 q – natężenie przepływu masy w $kg/s = 5,51 \times 10^{-5} \text{ kg/s}$ jak wyliczono w kroku pierwszym,
 T – temperatura bezwzględna gazu w K = 283 K,
 M – masa molowa = 27.2 Kg/mol.

czyli:

$$Q_{CH_4} = 0,0493 \times 5,51 \times 10^{-5} \times \frac{283}{27,2} = 2,83 \times 10^{-5} \frac{m^3}{s}$$

Krok 3: użycie równania 3 do znalezienia promienia strefy, x

$$x = \left(\frac{1840 \times Q_{CH_4}}{k \times E_{\%}} \right)^{0,55}$$

gdzie:

x – promień strefy w [m],
 Q_{CH_4} – natężenie przepływu objętości metanu obliczone z równania 2 = $2,83 \times 10^{-5} \text{ m}^3/s$,

k – współczynnik bezpieczeństwa stosowany do $DGW = 0,5$ dla wycieku drugiego stopnia,
 $E_{\%}$ - dolna granica wybuchowości w $\% = 4,4$.

czyli:

$$x = \left(\frac{1840 \times 2,83 \times 10^{-5}}{0,5 \times 4,4} \right)^{0,55} = 0,127m \text{ po zaokrągleniu } x = 0,2m$$

Przykład 2: znaleźć promień strefy dla studni gazowej o swobodnej wentylacji.

W tym przykładzie przyjęto, że studnia gazowa jest pod ciśnieniem atm. Przy ustalonym poziomie wentylacji cała produkcja gazu wynosi, około $30 \text{ m}^3/\text{h}$ i jest odprowadzana do atmosfery. Jaki promień strefy należy wyznaczyć wokół nieszczelnej pokrywy studzienki.

Równania 1 i 2 nie są potrzebne, ponieważ znane jest Q_{CH_4} . wynosi ono $30 \text{ m}^3/\text{h} =$ Używamy równania 3:

$$x = \left(\frac{1840 \times Q_{CH_4}}{k \times E_{\%}} \right)^{0,55}$$

gdzie:

x – promień strefy w [m],

Q_{CH_4} – natężenie przepływu objętości metanu, którego zawartość wynosi 60% z $30 \text{ m}^3/\text{h} > 18 \text{ m}^3/\text{h} = 18/3600 = 0,005 \text{ m}^3/\text{s}$,

k – współczynnik bezpieczeństwa stosowany do $LEL = 0,5$ dla wycieku drugiego stopnia,

$E_{\%}$ - dolna granica wybuchowości w $\% = 4,4$.

czyli:

$$x = \left(\frac{1840 \times 0,005}{0,5 \times 4,4} \right)^{0,55} = 2,197m \text{ należy zaokrąglić do } x = 2,2m$$

Wnioski

Jeśli gaz wysypiskowy jest generowany w miejscach wystawionych na działanie atmosfery to wydobywa się on na powierzchnię takiego wysypiska a następnie ulega rozproszeniu w atmosferze. Wydobywanie się gazu nie jest jednolite. Gaz wydostaje się na powierzchnie poprzez różnego rodzaju szczeliny w podłożu, które stawiają mniejszy lub większy opór. W efekcie gaz, by wydostać się na powierzchnię musi „obrać” trasę stawiającą najmniejszy opór. Skutkiem jest nierównomierna dystrybucja gazu z takiej powierzchni.

Ten naturalny proces wydobywania się gazu na powierzchnię odbywa się ciągle i może zakończyć się powstaniem atmosfery wybuchowej na powierzchni wysypiska. Błędne byłoby jednak wyznaczanie strefy 0 nad całą powierzchnią wysypiska. W miejscach gdzie gaz wydostaje się na otwartą przestrzeń, ryzyko wybuchu i zapłonu jest bardzo niskie. Przyjmuje się, że zasięg strefy jest pomijalnie mały i nie zaznacza się jej na rysunkach klasyfikacji obszarów. Badania pokazują, że gaz na powierzchni wysypiska pojawia się w odległości kilku centymetrów od gruntu, jednak nie zawsze osiąga stężenia DGW w związku, z czym nie jest groźny.

W kolejnej części artykułu wskazane zostają metody graficznego określania zasięgu stref ,dla takich elementów instalacji jak studnie, zawory, połączenia, itp.

st. kpt. mgr inż. Robert Żuczek.

Literatura:

1. Area Classification for landfill gas extraction, utilization and combustion. Industry Code of Practice ESA ICoP edition 2.
2. Drilling into landfill waste. Industry Code of Practice. ESA ICoP 4 edition 1.
3. Area Classification for leachate extraction, treatment and disposal. Industry Code of Practice. ESA ICoP 03 edition 1.