

KURTYNY POWIETRZNE JAKO WYDZIELENIE STREF NEIZADYMIONYCH NA WYPADEK POŻARU W OBIEKTACH BUDOWLANYCH

Grzegorz KRAJEWSKI*

* Instytut Techniki Budowlanej, Zakład Badań Ogniwych
ul. Ksawerów 21, 02-656 Warszawa,
e-mail: g.krajewski@itb.pl

Streszczenie: Kurtyny powietrzne są stosowane jako wirtualne płaszczyzny pozwalające na zredukowanie wymiany ciepła i masy pomiędzy dwoma przyległymi do siebie strefami o różnych parametrach środowiska. Wytwarza ona odpowiednio duże ciśnienie dynamiczne na wylocie uniemożliwiając tym samym poprzeczny przepływ poprzez otwór w którym jest zlokalizowana. Kurtyn powietrzne mogą być wykorzystane do ograniczenia rozprzestrzeniania dymu w przypadku pożaru przez co wydzielenie stref niezadymionych.

Słowa kluczowe: Kurtyny powietrzne, efektywność kurtyny, pożar, obliczenia numeryczne, CFD..

1. WPROWADZENIE

Kurtyny powietrzne datują swoje powstanie od 1904 r. Jako pierwszy opatentował je w USA T. Van Kennet jako metodę na powstrzymanie przepływu powietrza poprzez sztucznie wytworzony strumień powietrza nawiewanego. Pomysł ten doczekał się pierwszej realizacji ponad 10 lat później.

Pierwsza kurtyna powietrzna została zbudowana (pionowa) w 1916 roku przez Caldwell'a i służyła ona do wydzielenia hipodromu od przestrzeni zewnętrznej trzema kurtynami powietrznymi. Od tego czasu można zauważyć znaczny rozwój kurtyn powietrznych jak i coraz szerszy obszar ich zastosowania.

Kurtyny powietrzne znajdują bardzo szerokie zastosowanie przy wejściach do budynków użyteczności publicznej (domy towarowe, kina, biura, restauracje) oraz bramy budynków przemysłowych (magazyny, hale produkcyjne, hangary) co w znaczny sposób ułatwia możliwość przemieszczania się ludzi, transportu towarów jak i poruszanie się pojazdów.

Kurtyny powietrzne znalazły także bardzo szerokie zastosowanie w niektórych procesach technologicznych np. do odcięcia przestrzeni o znacznych zyskach ciepła oraz o znacznym wydzielaniu się substancji szkodliwych tj. opary chemiczne, zapachy, bakterie, kurz, insekty jak i cząsteczki radioaktywne.

Innym możliwym zastosowaniem kurtyn powietrznych jest ich wykorzystanie w inżynierii bezpieczeństwa pożarowego w celu kontroli rozprzestrzeniania dymu i toksycznych gazów powstałych w wyniku pożarów poprzez co zapewnienie bezpiecznego dostępu do wyjść ewakuacyjnych dla ludzi znajdujących się w obiekcie.

Podstawowym kryterium do oceny skuteczności (efektywności) kurtyny powietrznej jest stosunek wymiany ciepła bądź masy w momencie działania kurtyny do ilości, która przepływa w przypadku jej braku.

Jedną z możliwości pomiaru efektywności kurtyny powietrznej jest wykorzystanie metody gazu znacznikowego. Obecne instalacje kurtyn powietrznych są regulowane w oparciu o badania modelowe bądź też bardzo drogie badania w pełnej skali. Jednakże brak jest dokładnie sprecyzowanych wytycznych odnośnie parametrów jakie powinna spełniać kurtyna powietrzna wykorzystywana do celów bezpieczeństwa pożarowego.

2. CHARAKTERYSTYKA KURTYNY POWIETRZNEJ

Kurtyna powietrzna jest sztucznie wytworzonym strumieniem powietrza oddziałującym na naturalny przepływ przez otwór, w którym jest zainstalowana. Podstawą teoretyczną do analiz kurtyn powietrznych jest teoria strumienia swobodnego.

W bezpieczeństwie pożarowym do wydzielenia stref niezadymionych, istotnym jest by kurtyna funkcjonowała jako odcinająca. Kurtyny powietrzne mogące spełnić to wymaganie będą charakteryzowały się cienkim strumieniem powietrza o dużej prędkości.

2.1. Parametry fizyczne strumienia swobodnego

W kurtynie powietrznej jako płaskim strumieniu swobodnym możemy wyróżnić cztery podstawowe strefy [2]: potencjalny rdzeń, strefę przejściową, strefę rozwiniętą i strefę rozpraszającą (zamierania strumienia). Znajomość charakterystyki niniejszych stref jest niezbędna do prowadzenia analiz dotyczących szczelności kurtyny powietrznej jak i jej zachowań pod wpływem oddziaływania czynników zewnętrznych.

2.2. Ukształtowanie strugi swobodnej

Każda kurtyna powietrzna ma swój charakterystyczny kształt zależny od geometrii przestrzeni, w której jest zainstalowana jak i od warunków zewnętrznych panujących w jej otoczeniu. Kurtynę powietrzną zainstalowaną w tunelu o długości nie wpływającej na jej ukształtowanie możemy opisać za pomocą 8 zmiennych: ΔP , H , e , α , U_0 , I_0 , ν , ρ . Zmienne te mogą zostać zapisane w postaci pięciu bezwymiarowych liczb opisujących niniejsze zagadnienie:

$$\frac{\Delta P}{\frac{1}{2}\rho U_0^2} = f\left[\frac{H}{e}, \frac{U_0 e}{\nu}, I_0, \alpha\right]$$

Będących odpowiednio: liczbą Eulera, stosunkiem geometrycznym, liczbą Reynoldsa, intensywnością turbulencji oraz kątem nawiewanego strumienia.

Powyższa funkcja musi zostać rozwiązana w sposób analityczny, eksperymentalny bądź z wykorzystaniem metody CFD.

W celu oceny skuteczności kurtyny powietrznej, koniecznym jest zdefiniowanie minimalnej prędkości nawiewu U_0 , pozwalającą na pokonanie poprzecznej różnicy ciśnienia ΔP powstającej między sąsiadującymi przestrzeniami rozdzielonymi kurtyną powietrzną. Nawiewana płaska struga powietrzna zamyka otwór kompensując tę różnicę ciśnienia. Pomijając lepkość jak i siły grawitacji, jednocześnie zakładając warunki ustalone środowiska możemy przyjąć, że kształt kurtyny powietrznej może być traktowany jako łuk koła o promieniu R .

$$R = \frac{\rho U_0^2 e}{\Delta P}$$

Opierając się na powyższym równaniu i zakładając, że jedynym znaczącym czynnikiem zewnętrznym jest oddziaływujące ciśnienie na powierzchni objętości kontrolnej oraz,

że moment pędu jest zachowany w kierunku przepływu strugi nawiewanego powietrza, równania x i y momentu pędu dla objętości kontrolnej mogą być wyrażone następująco:

$$\Delta p dy = -(\rho_o / g_c) b_o u_o^2 \sin(\alpha) d\alpha$$

$$\Delta p dx = (\rho_o / g_c) b_o u_o^2 \cos(\alpha) d\alpha$$

Po złożeniu powyższych równań i podstawieniu $y=0$, $\alpha=\alpha_o$, kiedy $x=0$:

$$y_c = \frac{\rho_o b_o u_o^2}{g_c \Delta p} (\cos \alpha_o - \cos \alpha)$$

$$x_c = \frac{\rho_o b_o u_o^2}{g_c \Delta p} (\sin \alpha - \sin \alpha_o)$$

Gdzie x_c i y_c są współrzędnymi osi kurtyny powietrznej. Po usunięciu α z równania otrzymujemy równanie opisujące kształt kurtyny powietrznej.

$$\left(\frac{g_c \Delta p}{\rho_o b_o u_o^2} x_c + \sin \alpha_o\right)^2 + \left(\frac{g_c \Delta p}{\rho_o b_o u_o^2} x_c - \cos \alpha_o\right)^2 = 1$$

gdzie:

g_c - przyspieszenie ziemskie [m/s^2]

Δp - różnica ciśnienia między środowiskami przyległymi do kurtyny powietrznej [Pa]

ρ_o - gęstość nawiewanego powietrza [kg/m^3]

b_o - szerokość szczeliny nawiewnej [m]

u_o - prędkość nawiewu na wylocie [m/s]

α_o - kąt nawiewu strugi powietrznej [$^\circ$]

2.3. Metoda określania szczelności kurtyny powietrznej

Kurtyna powietrzna powinna ograniczać przepływ masy jak i ciepła pomiędzy sąsiadującymi przestrzeniami. Szczelność kurtyny stanowi o jej efektywności, będącej stosunkiem ilości ciepła bądź masy przepływających przez działającą kurtynę powietrzną do ilości, która przepływa w przypadku jej braku.

Określenie szczelności kurtyny powietrznej nie jest łatwe do oszacowania. W celu dokonania dokładnych pomiarów wykorzystuje się metodę opartą na pomiarze spadku stężenia gazu znacznikowego w przestrzeni oddzielonej kurtyną powietrzną (concentration decay method based on gaseous tracer). Gaz stosowany do tego typu analiz musi być gazem obojętnym nie reagującym. W tym celu stosuje się np. dwutlenek węgla lub tlenek azotu.

W początkowej fazie do badanej przestrzeni wprowadzany jest gaz znacznikowy do momentu osiągnięcia wymaganego stężenia. Po zadziałaniu kurtyny powietrznej

dokonyuje się pomiarów spadku stężenia gazu, co można opisać następującym wyrażeniem:

$$C(t) = C_0 e^{-\frac{q}{V}t} = C_0 e^{-At}$$

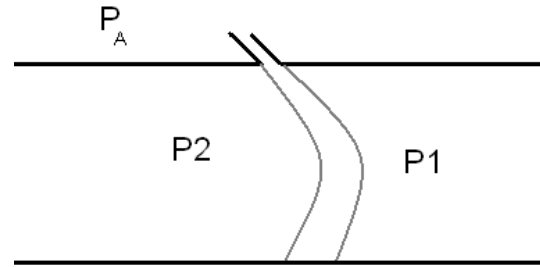
$C(t)$ - koncentracja gazu w dowolnej chwili czasowej [ppm]
 C_0 - początkowa koncentracja gazu [ppm]
 q - przepływ przez kurtynę powietrzną [m^3/s]
 V - objętość badanej przestrzeni [m^3]
 A - współczynnik transferu masy [1/s]
 t - czas [s]

Na tej podstawie możliwe jest określenie efektywności kurtyny powietrznej dla różnych wymiarów geometrycznych analizowanej przestrzeni, kątów nawiewanej strugi α , jej szerokości oraz prędkości U_0 jak i zmiennych parametrów środowiska takich jak: różnica ciśnienia oddziałującego na kurtynę ΔP oraz temperatura T . Powyższą metodę wykorzystuje się w czasie prowadzenia analiz w skali modelowej. Można ją także z powodzeniem zastosować w przypadku analiz numerycznych (CFD). Wykorzystanie metody numerycznej mechaniki płynów pozwala na znacznie dokładniejsze określenie skuteczności kurtyny, poprzez wyeliminowanie konieczności przeskalowania badanej kurtyny, co jest trudne do wykonania i obciążone bardzo dużym błędem co wynika z dotychczas prowadzonych badań [3, 4].

3. METODYKA PROWADZONYCH ANALIZ

3.1. Przyjęte założenia

W podjętych analizach możliwości zastosowania kurtyn powietrznych do wydzielenia obszarów niezadymionych przyjęto założenie, że kurtyna powietrzna powinna nawiewać tyle powietrza, żeby zrównoważyć różnicę ciśnienia między dwoma sąsiadującymi obszarami, przez nią wydzielonymi. W momencie spełnienia powyższego założenia kurtyna powietrzna powinna być w stanie powstrzymać przepływ dymu i toksycznych gazów powstałych w wyniku pożaru. Kurtyna powietrzna jest uważana za skuteczną (efektywną) w momencie, kiedy różnica ciśnienia $P_1 - P_A$ jest równa 0, gdzie P_1 – ciśnienie statyczne po stronie objętej pożarem (nadciśnienie), zaś P_A – ciśnienie atmosferyczne (Rys. 1). W tym przypadku, średnia masa powietrza (gazów) napływająca do tunelu jest równa 0, zaś ilość powietrza wypływająca z chronionego obszaru jest równa ilości powietrza nawiewanego przez kurtynę powietrzną.

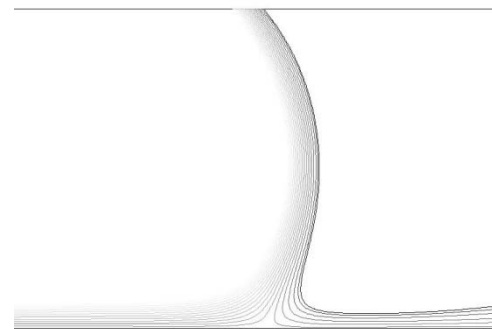


Rys. 1. Schemat analizowanej przestrzeni.
 Fig. 1. Domain with air curtain.

3.2. Analizy numeryczne

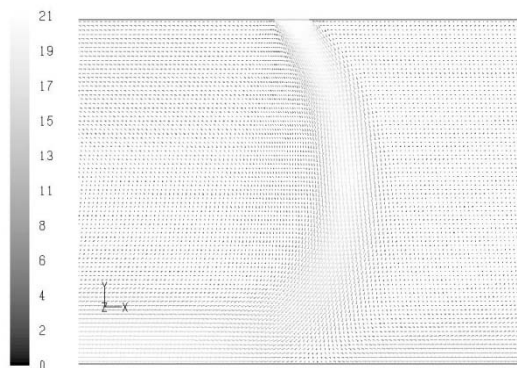
W celu oceny możliwości zastosowania kurtyn powietrznych jako wydzielenia obszarów niezadymionych na wypadek powstania pożaru przeprowadzono szereg analiz numerycznych wykorzystujących metodę numerycznej mechaniki płynów (CFD).

Na potrzeby wstępnych analiz stworzono model dwuwymiarowy 2D analizowanej przestrzeni w celu oceny zgodności otrzymanych wyników z obliczeniami analitycznymi. Obliczenia numeryczne przeprowadzono przy wykorzystaniu oprogramowania ANSYS Fluent w Wersji 13. Obszar analizowanej przestrzeni podzielono za pomocą siatki czworobocznej. Dokonano zagęszczenia obszaru, w którym spodziewano się dużych gradientów prędkości tzn. wylot nawiewanego powietrza oraz przestrzeń w której znajdował się strumień wytworzony przez kurtynę. Przeanalizowano min. takie parametry jak ugięcie kurtyny powietrznej przedstawione na Rys. 2



Rys.2. Ugięcie nawiewanej strugi powietrznej.
 Fig. 2. Curvature of an air curtain.

Jednocześnie dla wszystkich analizowanych przypadków został poddany weryfikacji rozkład prędkości w osi nawiewanej strugi powietrza Rys. 3.



Rys. 3. Rozkład prędkości w przekroju przez kurtynę powietrzną.
Fig. 3. Velocity distribution in a cross section of an air curtain..

Dodatkowo przeprowadzono wstępne analizy możliwości zastosowania kurtyny powietrznej jako pełnego wydzielenia stref niezanieczyszczonych dymem powstałym na skutek pożaru Rys 4.



Rys.4. Przewidywane stężenie gazów zanieczyszczonych w przestrzeni odciętej za pomocą kurtyny powietrznej.

Fig. 4. Predicted concentration of gaseous in area cut by an air curtain.

4. PODSUMOWANIE

Na podstawie przeprowadzonych analiz numerycznych wykorzystujących metodę numerycznej mechaniki płynów (CFD), potwierdzono prawidłowość odwzorowania charakteru nawiewanej płaskiej strugi powietrza. Otrzymane wyniki odniesiono do obliczeń analitycznych jak i wyników eksperymentalnych prowadzonych w skali modelowej. Otrzymane wyniki analiz posłużą do przygotowania stanowiska badawczego w pełnej skali a także do szczegółowego określenia parametrów kurtyny powietrznej mającej zastosowanie w bezpieczeństwie pożarowym jako wydzielenie stref niezadymionych na wypadek powstania pożaru..

AIR CURTAINS AS A DIVISION ZONES FREE OF SMOKE IN CASE OF FIRE

Summary: Air curtains are used as virtual screens to reduce mass and heat transfer from one zone to another subjected to different environmental conditions. It produces a pressure drop that forbids transversal flow through the opening. In article there will be presented an idea of using air curtains as a device to separate zones free of smoke in case of fire. There will be presented an idea how to use CFD method to analyze efficiency of an air curtain using concentration decay method based on gaseous tracer usually used in scaled models.

Literatura

- [1] J. Januszewski, A. Szajner, W. Wasiluk: *Zastosowanie kurtyn powietrznych w przemyśle*, Technika Ciepła 1976
- [2] Rajaratnam N., *Turbulent Jets*, Elsevier, Amsterdam 1976
- [3] Guyonnaud L., Sollicec C., *Mass transfer analysis of an air curtain system*, Transactions on Engineering Science vol. 18, 1998 WTT Press
- [4] L. Guyonnaud, C. Sollicec, M. Dufresene de Virel, C. Rey, *Design of air curtains used for area confinement in tunnels*, Experiments in Fluids 28 (2000) 377-384 Springer-Verlag 2000