

Zbigniew TRZECIAKIEWICZ, Zbigniew POPIOŁEK, Stanisław MIERZWIŃSKI
Politechnika Śląska w Gliwicach

PROGNOZOWANIE WENTYLACJI WYPOROWEJ PRZY ROZLEGŁYCH ŹRÓDŁACH CIEPŁA

Streszczenie. Przedstawiono wyniki badań nad formowaniem dwustrefowego rozdziału powietrza w pomieszczeniu z wentylacją waporową przy różnych źródłach ciepła i przy zmianach wydatku nawiewu. Położenie warstwy i umownej granicy rozdziału stref określano eksperymentalnie, na podstawie pomiarów rozkładu stężeń znacznika gazowego oraz obliczeniowo – posługując się modelem strugi konwekcyjnej nad punktowym źródłem ciepła. Wartości parametrów modelu określano eksperymentalnie dla każdego źródła ciepła w pomieszczeniu, jakim były kolejno: symulator strug konwekcyjnych, lampa stołowa, komputer, okrągła płytka i człowiek. Powietrze doprowadzono poprzez nawiewniki quasi-laminarne.

Wyniki badań wskazują, że przy prognozowaniu położenia granicy rozdziału stref w przypadkach z rzeczywistymi, rozległymi źródłami ciepła, można korzystać z modelu strugi konwekcyjnej nad punktowym źródłem ciepła, jeżeli w modelu takim wartości parametrów k_v i z_v zostaną eksperymentalnie dobrane.

DISPLACEMENT VENTILATION PREDICTION IN A LARGE HEAT SOURCES CONDITIONS

Summary. The paper presents the results of the tests of two-zone airflow pattern forming in a room with displacement ventilation where various heat sources and various airflow rates were tested. The test results show that in order to define the interface position in displacement ventilation where real extensive heat sources are used, it is possible to apply the experimentally completed model of plume above a point heat source.

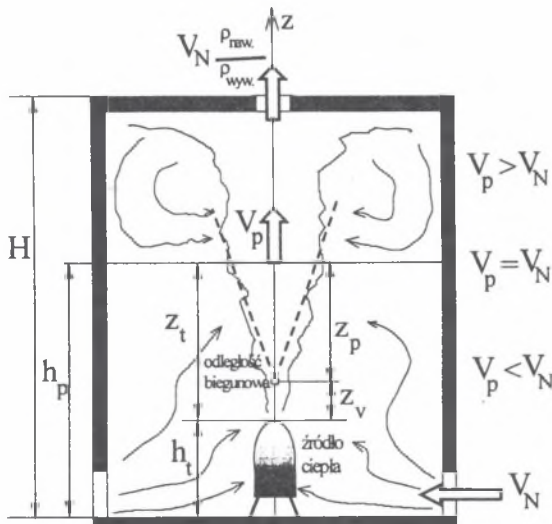
1. Wprowadzenie

Obraz przepływu powietrza w klasycznym wydaniu wentylacji waporowej – według modelu *“filling a box with a plume”* [1] - charakteryzuje się tworzeniem w pomieszczeniu dwóch poziomych stref przepływowych: strefy dolnej, napływu powietrza do strugi konwekcyjnej, oraz strefy górnej, cyrkulacji i mieszania powietrza. Strefy te mają różną

charakterystykę przepływową. Między nimi pojawia się granica rozdziału, zawierająca skok stratyfikacji termicznej powietrza i skok stężenia zanieczyszczeń.

Granica rozdziału stref lokalizuje się na poziomie, gdzie wydatek strugi konwekcyjnej zrównuje się ze strumieniem powietrza nawiewanego. Na tym poziomie bowiem zanikają siły wyporu w wyniku zrównania się temperatur powietrza strugi i otoczenia, a posiadany pęd struga wykorzystuje na indukowanie cyrkulacji i mieszanie powietrza w górnej strefie.

W rzeczywistości zanik sił wyporu nie jest dokładnie skokowy, co rozmywa granicę rozdziału stref do warstwy o pewnej grubości. Stąd szczegółowe położenie granicy stref w obrębie tej warstwy może być określone tylko umownie.



Rys. 1. Schemat dwustrefowego rozdziału powietrza przy wentylacji wyporowej
Fig. 1. Two zone air flow pattern in displacement ventilation

Na formowanie dwustrefowego rozdziału powietrza w rzeczywistych warunkach wentylacji wyporowej wywierają wpływ cztery czynniki:

- *strugi konwekcyjne*, które wnoszą siły wyporu termicznego,
- *strugi nawiewane*, które swoim wydatkiem warunkują wysokość położenia granicy rozdziału stref oraz
- *warunki cieplne i geometryczne pomieszczenia*, które stymulują rozkład temperatury powietrza w pomieszczeniu i tą drogą mogą także wpływać na wydatek strugi konwekcyjnej i położenie granicy rozdziału stref.

Wprawdzie wymienione czynniki mogą być kształtowane niezależnie, ale razem wpływają na obraz wentylacji wyporowej. Formowanie w pewnym pomieszczeniu dwustrefowego rozdziału powietrza, z odpowiednio wysoką strefą napływu, możliwe jest przy pewnych zakresach i proporcjach jednostkowej mocy źródła ciepła i wydatku strug nawiewanych [4]. Potrzebny jest także dobór właściwych warunków brzegowych dla wymienionych poprzednio czynników.

Analizę tych zależności przeprowadzono na stanowisku laboratoryjnym opierając się na eksperymentalnych badaniach.

2. Cel i metodyka badań

Celem badań było sprawdzenie możliwości wykorzystania eksperymentalno-obliczeniowej metody określania natężenia przepływu strugi konwekcyjnej nad rozległym źródłem ciepła [2] do prognozowania i regulacji położenia granicy rozdziału stref wentylacji wyporowej, gdy w pomieszczeniu znajdują się rzeczywiste, "rozległe" źródła ciepła.

Wymieniona metoda, obszernie przedstawiona w [2], polega na wprowadzaniu do znanego modelu strugi konwekcyjnej nad punktowym źródłem ciepła eksperymentalnie określonych wartości parametrów k_v i z_v (patrz rys.1).

$$V = k_v Q_z^{1/3} z_p^{5/3} = k_v Q_z^{1/3} (z_t - z_v)^{5/3} \quad (1)$$

gdzie: Q_z – zmierzona nadwyżka entalpii strugi konwekcyjnej w przekroju z_t ,

k_v – współczynnik wydatku,

z_p, z_t – odległość rozpatrywanego przekroju odpowiednio od pozornego bieguna i od wierzchołka rzeczywistego źródła ciepła,

z_v – odległość pozornego bieguna od wierzchołka źródła ciepła.

Równanie (1) w zasadzie opisuje burzliwą strugę konwekcyjną nad punktowym źródłem ciepła, rozwijającą się w neutralnym środowisku, bez stratyfikacji termicznej, $S = 0$. Wtedy nadwyżka entalpii strugi nie zmienia się z wysokością, a zatem zmierzona wartość Q_z powinna być równa konwekcyjnej emisji źródła ciepła, $Q_z = Q_c = \text{const}$.

W omawianej metodzie wymienione parametry tego równania wyznacza się eksperymentalnie, indywidualnie dla każdego rozległego źródła, na podstawie pomiarów prędkości i nadwyżki temperatury w przekroju strugi, leżącym w strefie rozwiniętej

burzliwości przepływu. Wyznacza się takie parametry, jak promienie strugi R_t i R_w , nadwyżkę entalpii Q_z i strumień objętości V_z na wybranym poziomie "z" oraz parametry k_v i z_v .

Pomiary te wykonywane są w pewnych rzeczywistych warunkach, a więc np. przy stratyfikacji termicznej otoczenia, $S = dt_{\infty}/dz \neq 0$. Wtedy nadwyżka entalpii strugi zmienia się z wysokością, co ma wpływ na uzyskane wartości parametrów równania (1).

Konwekcyjny wydatek źródła ciepła Q_c , który potrzebny jest do praktycznych obliczeń strugi, można określić z cieplnego bilansu źródła, albo opierając się na wartości Q_z , zmierzonej w aktualnych warunkach stratyfikacji termicznej otoczenia. Gdy stratyfikacja ta jest spowodowana kosztem tego samego źródła ciepła i praktycznie nie ma wymiany ciepła między powietrzem otaczającym strugę i przegrodami pomieszczenia, można posłużyć się uproszczoną zależnością:

$$Q_z = Q_c - \rho c_p \int_0^z V_p S^* dz \quad (2)$$

gdzie $S^* = d(t_{\infty} - t_{\infty 0})/dz$ oznacza gradient przyrostu temperatury ośrodka otaczającego.

Z równania (3), wynikającego z powiązania równań (2) i (1), można oszacować Q_c źródła, gdy Q_z , i S^* są znane z pomiarów.

$$Q_c = Q_z + (3/7) Q^{1/3} \rho c_p k_v S^* z^{7/3} \quad (3)$$

Ponieważ $Q_z = f(Q_c)$ jest funkcją uwikłaną, trzeba skorzystać z procedury "szukaj wyniku" lub "solver".

Z analizy równania (1) wynika, że aby utrzymać dokładność wyznaczania odległości z_p w granicach $\pm 4\%$, błędy określania innych wielkości nie powinny przekraczać: dla oszacowania nadwyżki entalpii w źródle $Q_c \pm 20\%$, dla określania współczynnika wydatku $k_v \pm 7\%$, a dla wyznaczenia odległości biegunowej $z_v \pm 4\%$.

Położenie granicy rozdziału stref analizowano dwiema metodami:

- *obliczeniowo*, w sposób oparty na znanym modelu "filling a box with a plume", korzystając z przedstawionej metody prognozowania wydatku strugi konwekcyjnej. Sposób ten polega na założeniu, że poziom, gdzie wydatek strugi konwekcyjnej zrównuje się ze strumieniem nawiewanym, $V_p = V_v$, odpowiada położeniu granicy rozdziału stref. Poszukiwaną wysokość $z_p = z_t - z_v$ położenia tej granicy nad pozornym biegunem źródła ciepła i korespondującą z nią wysokość h_p nad podłogą pomieszczenia (patrz rys.1) uzyskuje się z równania (1), przy wydatku strugi konwekcyjnej $V = V_p = V_v$, następująco:

$$h_p = h_t + z_v + k_v^{-3/5} Q_z^{-1/3} V_v^{3/5} \quad (4)$$

- *eksperymentalnie*, opierając się na pomiarze pionowego rozkładu stężenia znacznika gazowego, przyjmując umownie położenie granicy rozdziału stref na wysokości h_{50} , gdzie w otoczeniu strugi konwekcyjnej pojawia się 50%-procentowy przyrost stężenia znacznika gazowego.

3. Wyniki badań

Ogółem wykonano 25 serii pomiarowych, różniących się rodzajem i mocą źródła ciepła, wysokością jego lokalizacji, liczbą wymian powietrza wentylacyjnego oraz sposobem nawiewania powietrza.

Badania prowadzono w pomieszczeniu o wymiarach 3×3×3 m. Powietrze było nawiewane przez jeden lub dwa nawiewniki quasi-laminarne, umieszczone w przeciwnych narożnikach pomieszczenia i usuwane poprzez wywiewnik sufitowy - w ilości odpowiadającej liczbom 1+7 wymian powietrza w ciągu godziny. Przyrost temperatury powietrza w pomieszczeniu wynosił 2 do 11 K.

Wykorzystano źródła ciepła o różnych kształtach i mocy: źródła o *prostym kształcie*, jak symulator strug konwekcyjnych [2] o mocy 250 i 490 W, który umożliwiał także generowanie strug o różnej liczbie Archimedes'a i okrągła płytka o mocy 600 W oraz źródła o *złożonym kształcie*, jak lampa biurowa, komputer z monitorem i człowiek. Moc źródła ciepła mogła być zatem zmieniana w granicach od 80 do 600 W (do 66 W/m²). Górną krawędź źródeł ciepła lokalizowano na wysokości 0.5 + 1.3 m ponad powierzchnią podłogi.

Stacjonarne układy termopar umożliwiały wyznaczanie pionowego rozkładu temperatury powietrza w otoczeniu strugi oraz określanie strat ciepła przez przegrody. Ruchome układy pomiarowe umożliwiały pomiar rozkładu temperatury i prędkości powietrza w strudze konwekcyjnej oraz pomiar rozkładu stężenia znacznika gazowego na dowolnej wysokości poza strugą. Znacznik gazowy wprowadzano do strugi tuż nad źródłem ciepła.

Na rys.2 przedstawiono wyniki badań położenia granicy stref, opartych na pomiarach pionowego rozkładu stężeń znacznika gazowego w otoczeniu strugi konwekcyjnej. Położenie tej granicy określano jako wysokość h_{50} nad podłogą, na której występuje 50-procentowy przyrost stężenia znacznika. Na rys.2 przedstawiono także pionowe rozkłady simpleksu temperatury powietrza w otoczeniu strugi $(t_z - t_{\text{nawiewu}})/(t_{\text{wywiewu}} - t_{\text{nawiewu}})$.

Współczynnik wydatku k_v i odległość biegunową z_v wyznaczano dla każdego źródła ciepła indywidualnie. Do wyznaczenia tych parametrów wybrano serie odpowiadające najmniejszej liczbie wymian, tj. 1 na godz. = 0,0075 m³/s, w tych przypadkach obserwowano bowiem najmniejszą wartość stratyfikacji w otoczeniu strugi.

Parametry określono na podstawie rozkładów prędkości i nadwyżki temperatury w strefie rozwiniętej turbulencji strugi, która występowała na wysokości około 1,4 m nad biegunem, gdzie $R_t \approx R_w = 0,15 \div 0,20$ m. Współczynnik wydatku k_v wyznaczano, korzystając ze zmierzonej nadwyżki entalpii strugi Q_z na wysokości 1,4 m, drogą optymalizacji komputerowej minimalizując $\Sigma(V_{\text{obliczane}} - V_{\text{zmierzone}})^2$. Odległość biegunową wyznaczano z zależności [2] $z_v = z_t - 7,75 R_{wt}$.

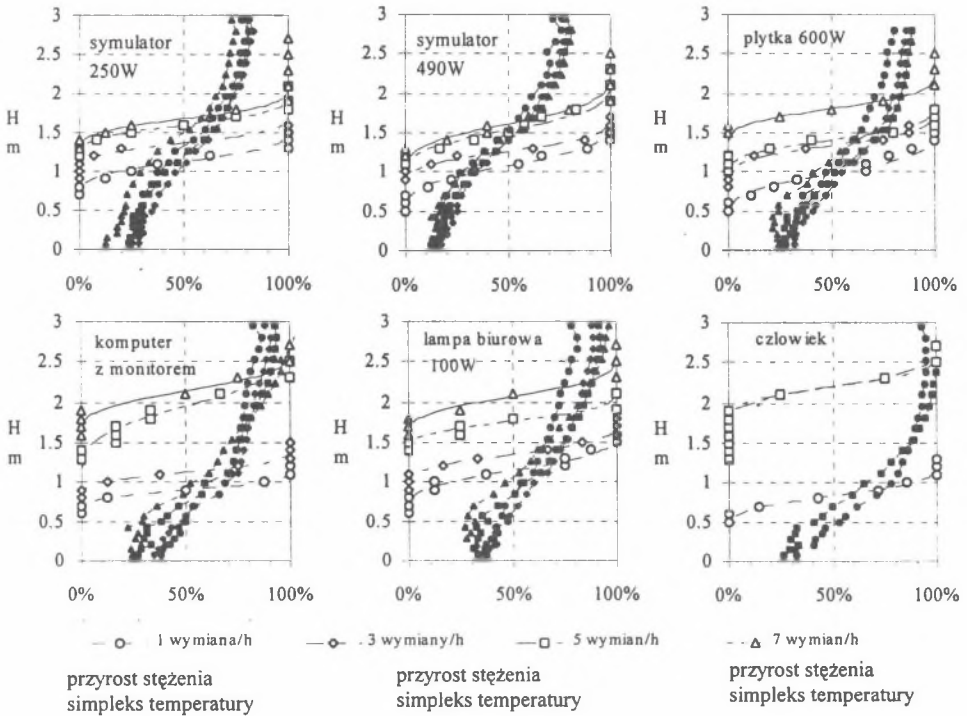
W tabl.1 zestawiono wyznaczone parametry badanych strug. Na rys.3 przedstawiono błąd wyznaczania strumienia objętości strug konwekcyjnych $(V_{\text{obliczane}} - V_{\text{zmierzone}})/V_{\text{zmierzone}}$ według proponowanej metody. Średnia wartość tego błędu wynosi 1%, a wartość przeciętna 12%. Wartości te mogą wzrosnąć dla niektórych źródeł ciepła o około 10%, jeżeli przyjmie się średnią wartość $k_v = 0,006$.

Tabela 1

Zestawienie wyznaczonych wartości k_v i z_v

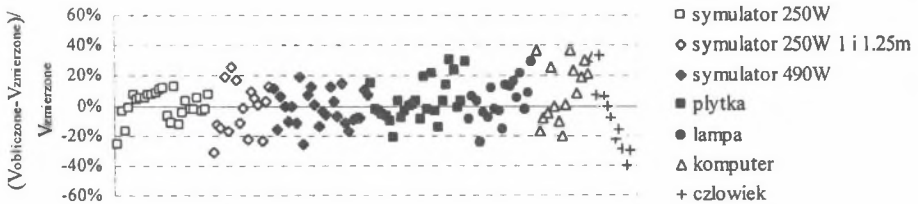
Źródło ciepła	n	S	Q _C	Q _{z=1.4m}	k _v	z _v
	1/h	K/m	W	W	-	m
Symulator 250W	1	2	245	170	0.0056	0.12
Symulator 490W	1	3	445	307	0.0060	0.26
Komputer	1	1.8	57	22.5	0.0055	-0.49
Lampa 100W	1	0.9	37	20	0.0068	0.2
Płytki 600W	1	2	187	120	0.0061	0.16
Człowiek	1	1	32	15	0.0055	-0.56

Na rys.4 przedstawiono zależność między wysokością położenia granicy stref h_p , obliczaną na podstawie równania (4), a wysokością h_{50} , wyznaczaną z rozkładu stężeń znacznika gazowego.



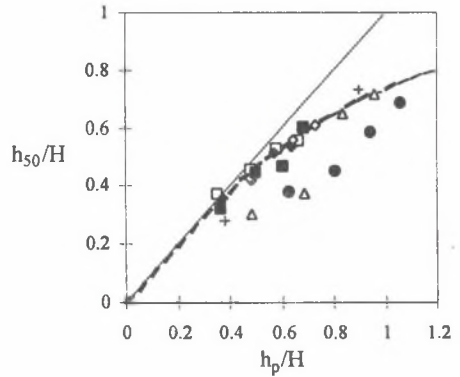
Rys. 2. Przykładowe wyniki pomiaru pionowych rozkładów stężeń znacznika gazowego (puste oznaczenia) i pionowych rozkładów temperatury powietrza w otoczeniu strugi (zaczernione oznaczenia) w pomieszczeniu z wentylacją wyporową

Fig. 2. Results of vertical distribution measurements of tracer gas concentration (markers empty) and simplex of air temperature in the plume surroundings (filled markers) in the room with displacement ventilation



Rys. 3. Błąd wyznaczania strumienia objętości strug konwekcyjnych według proponowanej metody
Fig. 3. Errors of the air volume flux calculation in plumes, according to the model suggested

- symulator 250W
- symulator 490W
- ◇ symulator 250W wys. 1 i 1.25m
- △ komputer
- lampa
- płytka $d=0.15\text{m}$
- + człowiek
- trend line



Rys. 4. Zależność pomiędzy prognozowaną wysokością granicy stref a wysokością wyznaczoną doświadczalnie

Fig. 4. Relation between the predicted interface elevation and the elevation determined experimentally

4. Omówienie wyników badań

Analiza uzyskanych wyników, której tutaj nie podbudowuje się szczegółowymi danymi, nasuwa następujące spostrzeżenia:

- Umowna granica oraz grubość warstwy rozdziału stref napływu i cyrkulacji mogą być dokładnie wyznaczone z pionowego rozkładu stężeń znacznika gazowego, dozowanego w źródle strugi konwekcyjnej.
- Pionowy rozkład temperatury powietrza w pomieszczeniu nie pozwala na wyznaczenie położenia granicy stref, gdyż skok temperatury, przewidywany w klasycznym modelu wentylacji wyporowej, jest w rzeczywistych warunkach rozmyty.
- Przy źródłach ciepła o geometrycznie *prostym kształcie*, który nie wprowadza znaczących zakłóceń w procesie generowania strugi konwekcyjnej (symulator, okrągła płytka), wysokość h_p położenia granicy stref, obliczona wg wzoru (4), jest do poziomu ok. 60% wysokości pomieszczenia zgodna z eksperymentalnie określoną wysokością h_{50} (rys.4). Przy dalszym podnoszeniu tego poziomu pojawia się rozbieżność między h_{50} i h_p , która stopniowo powiększa się w miarę zwiększania wymiany powietrza.
- Obserwowana na rys.4 rozbieżność między eksperymentalnie określaną h_{50} i obliczaną h_p powstawać może w związku ze zjawiskami, które fizycznie rejestruje h_{50} , a których nie uwzględnia się przy obliczaniu h_p . Zjawiskami takimi mogą być: dynamiczne

oddziaływanie stropu na strugę konwekcyjną (obniża h_{50}) i krótkie spięcie w przepływie wywiew – nawiew (wpływa na wymianę ciepła i grad t_w), oraz stratyfikacja powietrza, podwyższająca obliczaną h_p , ale niewystarczająco uwzględniana przy obliczaniu h_p za pomocą wzoru (4). W przeprowadzonych badaniach zjawisk tych nie udało się dostatecznie zidentyfikować.

- Przy rozległych źródłach ciepła o złożonym kształcie i nieregularnych warunkach konwekcyjnego oddawania ciepła (lampa na stole) nie uzyskiwano zgodności h_{50} i h_p w całym zakresie wymiany powietrza wentylacyjnego, a przy źródłach rozległych, ale mniej skomplikowanych geometrycznie (komputer, człowiek), wartości h_{50} i h_p zbliżały się do siebie przy wysokich wymianach powietrza. W przypadku lampy i komputera eksperymentalna wysokość h_{50} niekiedy lokalizowała się poniżej wierzchołka źródła ciepła. W przypadku komputera zjawisko takie mogło być spowodowane m.i. zakłóceniami, jakie w strudze konwekcyjnej wywołuje jego wewnętrzny wentylator chłodzący, a w przypadku lampy stołowej – obecność biurka, które deformowało proces tworzenia się strugi konwekcyjnej.

5. Wnioski

1. Kształt źródła ciepła i sposób generowania strugi konwekcyjnej wywierają znaczący wpływ na dwustrefowy rozdział powietrza wentylacji wyporowej.
2. Przedstawiona metoda prognozowania położenia granicy rozdziału stref w wentylacji wyporowej, oparta na modelu strugi konwekcyjnej nad punktowym źródłem ciepła, z eksperymentalnie określonymi wartościami parametrów, może być z dobrym skutkiem stosowana w inżynierskich prognozach dla przypadków rozległych rzeczywistych źródeł ciepła, gdy źródła te nie wprowadzają znaczących zakłóceń w procesie generowania i formowania się strugi konwekcyjnej.

Badania zrealizowano w ramach projektu badawczego nr T07G 03 911, finansowanego przez Komitet Badań Naukowych.

LITERATURA

1. Sandberg M., Lindstrom S.: A model for ventilation by displacement, Proc. ROOMVENT'87, Sess.3, Stockholm 1987.

2. Popiołek Z., Trzeciakiewicz Z., Mierzwiński S.: Improvement of a Plume Volume Flux Calculation Method, Proc. 6th International Conference ROOMVENT'98, Stockholm 1998.
3. Popiołek Z.: Problems of testing and mathematical modelling of plumes above human body and other extensive heat sources. A4-serien Nr 54, Inst. for Uppvarmings och Ventilationsteknik, Royal Institute of Technology, Stockholm 1981.
4. Mierzwiński S., Popiołek Z., Trzeciakiewicz Z.: Experiments on Two-zone Air Flow Forming in Displacement Ventilation. Proc. 5th Intern. Confer. ROOMVENT '96, Vol.3. Yokohama 1996.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Teresa Jędrzejewska-Ścibak

Abstract

The paper presents the results of the tests of two-zone airflow pattern forming in a room with displacement ventilation where various heat sources and various airflow rates were tested. The position of the interface layer between the zones was determined experimentally – on the basis of tracer gas concentration measurement and on the way of calculation - on the basis of the plume model above a point heat source complemented with experiment. The following heat sources were used: a plume simulator, a desk lamp, a computer, a round plate and a human body. Quasi-laminar diffusers supplied the air. The test results show that in order to define the interface position in displacement ventilation where real extensive heat sources are used, it is possible to apply the experimentally completed model of plume above a point heat source.