



WYKORZYSTANIE BADAŃ MODELOWYCH W PRZYBLIŻONEJ OCENIE STRUMIENIA CIEPŁA JAWNEGO Z POWIERZCHNI ZABUDOWANEJ

Katarzyna KLEMM*

* Politechnika Łódzka, Instytut Inżynierii Środowiska i Instalacji Budowlanych, Zakład Gospodarki Przestrzennej i Geomatyki
al. Politechniki 6, 90-924 Łódź, e-mail: katarzyna.klemm@p.lodz.pl

Streszczenie: W pracy przedstawiona została propozycja oceny wielkości strumienia ciepła jawnego z powierzchni zabudowanej. Badania prowadzone były w tunelu aerodynamicznym przy przyjętych skalach podobieństwa $K_L = 100$, $K_U = 2$, $K_{Tx} = 8$ i $K_t = 50$. Turbulencyjny przepływ strumienia powietrza nad wymodelowanym obszarem zabudowy był rejestrowany przy wykorzystaniu wiązki światła laserowego. Określenie współczynnika struktury optycznej C_n^2 pozwoliło ustalić wielkość współczynnika struktury termicznej C_T^2 . Przyjmując profil prędkości wiatru o charakterze logarytmicznym wyznaczono wartość prędkości tarciowej, a w dalszej kolejności funkcji Monina - Obuchowa $f_T \left(\frac{z}{z_L} \right)$.

Na podstawie uzyskanych danych oszacowano skalę temperatury T_x i wielkość strumienia ciepła jawnego Q_H .

Słowa kluczowe: Badania modelowe, emisja ciepła, zabudowa, laser.

1. WPROWADZENIE

Zabudowa miejska odgrywa kluczową rolę w kształtowaniu klimatu lokalnego. Stanowi jedno z głównych źródeł antropogenicznych gazów cieplarnianych oraz ciepła. W ostatnich latach zwrócono szczególną uwagę na problemy związane z niekorzystnym oddziaływaniem miejskiej wyspy ciepła na zdrowie mieszkańców miast, jak również na straty energii związane z chłodzeniem obiektów. Odzwierciedleniem tych zainteresowań są liczne inicjatywy podejmowane przez kraje członkowskie UE mające na celu wypracowanie skutecznych metod przeciwdziałania i łagodzenia skutków miejskiej wyspy ciepła. Przykładem takich działań może być Program dla Europy Środkowej „Development and application of mitigation and adaptation strategies and measures for counteracting the global Urban Heat Islands phenomenon,” skupiający naukowców z

sześciu państw europejskich, w tym Polski. Jednym z celów programu jest opracowanie metod badawczych służących ocenie istniejących warunków mikroklimatu, jak również skuteczności zastosowanych rozwiązań. Wśród realizatorów programu znaleźli się między innymi urbaniści, meteorolodzy oraz specjaliści z zakresu fizyki budowli.

Istotne znaczenie dla zrozumienia specyficznych cech mikroklimatu w określonych układach zabudowy ma znajomość bilansu cieplnego, w tym turbulencyjnych strumieni ciepła jawnego. Pomimo istotnej roli bilansu cieplnego w kształtowaniu mikroklimatu istnieje stosunkowo niewiele danych pomiarowych pozwalających na zrozumienie stosunków cieplnych w mieście, czy na weryfikację istniejących modeli numerycznych. Najczęściej stosowanymi metodami pomiaru turbulencyjnych strumieni ciepła są metoda gradientowa, metoda kowariancji wirów, czy metoda scyntylacyjna. Metoda scyntylacyjna polega na pomiarach fluktuacji natężenia promieniowania elektromagnetycznego emitowanego przez nadajnik i odbieranego przez odbiornik. Odległość między przyrządami waha się od kilkudziesięciu metrów do kilku kilometrów. Podczas przejścia przez atmosferę fale elektromagnetyczne podlegają wielu procesom powodującym zmianę ich natężenia, polaryzacji i fazy. Wiry turbulencyjne wywołane emisją ciepła z powierzchni zabudowanej powodują fluktuacje współczynnika załamania na drodze przemieszczającej się fali i w konsekwencji fluktuacje natężenia promieniowania dochodzącego do odbiornika [4]. Z uwagi na wysokie koszty systemu pomiarowego oraz słabą znajomość metodyki pomiarowej metody te są rzadko stosowane. Jak wykazują pierwsze próby alternatywnym rozwiązaniem może stać się wykorzystanie metody laserowej w badaniach modelowych [5],[6],[7]. Zaletą tego typu badań jest

możliwość szybkiej analizy dowolnych układów budynków przy uwzględnieniu napływu powietrza z różnych kierunków.

2. PROFILE PRĘDKOŚCI WIATRU

Zależność prędkości wiatru od wysokości przedstawiana jest zazwyczaj za pomocą wzoru potęgowego lub logarytmicznego. W warstwie przyziemnej do wysokości rzędu 100÷200m dobrą zgodność z warunkami rzeczywistymi wykazuje wzór logarytmiczny uwzględniający tarcie wywołane szorstkością podłoża.

$$\bar{U}(z) = \frac{u_x}{\kappa} \ln \left(\frac{z}{z_o} \right) \quad (1)$$

gdzie:

κ - stała von Kármána (0,4),

u_x - prędkość tarciova $\left(\sqrt{\frac{\tau_o}{\rho}} \right)$ [m/s]

τ_o - powierzchniowe naprężenie ścinające [N/m²],

ρ - gęstość powietrza [kg/m³],

z_o - współczynnik szorstkości (zwany również parametrem chropowatości czy wysokością chropowatości) [m].

W celu wyeliminowania wpływu pojedynczych przeszkód na przepływ powietrza równanie powyższe może być stosowane w odległości $z > 20z_o$ od powierzchni gruntu. Według Panofskiego wzór logarytmiczny może być wykorzystywany do wysokości 150 m nad lądem, bez utraty dokładności [8]. W odniesieniu do obszarów zabudowanych lub zalesionych stosuje się zmodyfikowaną postać wzoru logarytmicznego [11], w której wysokość z zastąpiona jest przez wysokość efektywną ($z-z_d$). Wysokość z_d , zwana przemieszczeniem płaszczyzny zerowej, przyjmuje zwykle wartość równą 0,6 – 0,8 wysokości elementów zakłócających (budynki, zieleń).

Zakładając, że prędkość wiatru gradientowego U_G jest stała (na dystansie 10 – 100 km), można powiązać ze sobą profile prędkości dwóch terenów. Według Simiu [12] istnieje prosta zależność:

$$\frac{u_x}{u_{x1}} = \left(\frac{z_o}{z_{o1}} \right)^{0,0706} \quad (2)$$

Nawet przy umiarkowanych prędkościach wiatru, gdy z przekracza kilkadziesiąt metrów, mogą pojawić się odchylenia od profilu logarytmicznego. Są one spowodowane ruchem pionowym powietrza, wywołanym zmianami termicznymi. Gdy powierzchnia gruntu ulega w nocy ochłodzeniu, następuje osłabienie ruchu turbulencyjnego powietrza, co wyraża się gwałtownym wzrostem profilu prędkości z wysokością. Natomiast ogrzanie powierzchni w ciągu dnia nasila turbulencję i wywołuje stały wzrost profilu prędkości z wysokością.

$$\bar{U}(z) = \frac{u_x}{\kappa} \left(\ln \frac{z-z_d}{z_o} - \psi \left(\frac{z}{z_L} \right) \right) \quad (3)$$

dla $z > 20z_o + z_d$

gdzie:

z – wysokość [m],

z_o - współczynnik szorstkości [m],

z_d - przemieszczenie płaszczyzny zerowej [m],

z_L - długość Monina - Obuchowa [m],

κ - stała Kármána 0,4,

u_x - prędkość tarciova [m/s],

ψ - poprawka stabilności termicznej (funkcja Monina - Obuchova).

Wpływ powierzchniowych strumieni ciepła jest bardzo istotny. W warstwie powierzchniowej z/z_L jest parametrem stabilności, gdzie z_L - długość Monina - Obuchova jest zależna od [9]:

$$z_L = \frac{\rho T c_p u_x^3}{\kappa g H_o} \quad (4)$$

gdzie:

c_p - ciepło właściwe powietrza przy stałym ciśnieniu [J/K·kg],

T - temperatura powietrza [K],

g - przyspieszenie ziemskie [m/s²],

ρ - gęstość powietrza [kg/m³],

H_o - strumień ciepła [W/m²].

Parametr z/z_L przedstawia stosunek między termicznym i mechanicznym wpływem na turbulencję. Warstwa graniczna jest w przybliżeniu obojętna, gdy mechaniczny wpływ przeważa, a $|z/z_L| \ll 1$.

W warunkach nieoobojętnych istotna staje się poprawka $\psi(z/z_L)$

W przypadku stałej równowagi atmosfery [2]

$$\psi \left(\frac{z}{z_L} \right) = -5 \frac{z}{z_L}, \quad z/z_L > 0 \quad (5)$$

W warunkach równowagi chwiejnej [Petersen 1984] 1980]

$$\psi \left(\frac{z}{z_L} \right) = \left(1 - 16 \frac{z}{z_L} \right)^{1/4} - 1, \quad z/z_L < 0$$

3. FLUKTUACJE TURBULENCYJNEGO PRZEPLYWU POWIETRZA

W obszarach miejskich znaczny udział powierzchni sztucznych o niskim albedo przyczynia się do wzrostu turbulencji termicznej i temperatury powietrza. Z punktu widzenia kształtowania korzystnych warunków mikroklimatu wskazany jest zwiększony udział powierzchni naturalnych charakteryzujących się wysokimi wartościami albedo. Dzięki zastosowaniu zieleni możliwe staje się wzbudzenie lokalnych ruchów powietrza oraz

niwelowanie nadwyżek w bilansie cieplnym obszarów zabudowanych.

Fluktuacje turbulencyjnego przepływu powietrza charakteryzuje współczynnik struktury optycznej C_n^2 , który jest powiązany z parametrem struktury temperatury C_T^2 .

$$C_n^2 = \left[\frac{79P}{T^2} \cdot 10^{-6} \right]^2 \cdot C_T^2 \quad (6)$$

gdzie:

P - ciśnienie [hPa],

T - temperatura [K],

C_T - współczynnik struktury temperatury [$K \cdot m^{-1/3}$].

Dysponując parametrem struktury temperatury C_T^2 można wyznaczyć turbulencyjny strumień ciepła jawnego Q_H . Teoria podobieństwa Monina – Obuchowa wiąże parametr C_T^2 , określony w warstwie powierzchniowej (na wysokości efektywnej z_{ef}) ze strumieniem ciepła jawnego [13].

$$C_T^2(z_{ef})^{2/3} \cdot T_x^{-2} = f_T \left(\frac{z_{ef}}{z_L} \right) \quad (7)$$

gdzie:

z_{ef} - efektywna wysokość ścieżki pomiarowej,

T_x - skala temperatury

$f_T \left(\frac{z_{ef}}{z_L} \right)$ - funkcja podobieństwa teorii Monina - Obuchowa

Funkcja $f_T \left(\frac{z_{ef}}{z_L} \right)$ dla stałych warunków pogodowych może być przyjęta w postaci

$$f_T \left(\frac{z_{ef}}{z_L} \right) = 4 \left[1 + 7 \left(\frac{z_{ef}}{z_L} \right) + 20 \left(\frac{z_{ef}}{z_L} \right)^2 \right]^{1/3}, \frac{z_{ef}}{z_L} > 0 \quad (8)$$

a dla warunków chwiejnych

$$f_T \left(\frac{z_{ef}}{z_L} \right) = 4 \left[1 - 7 \left(\frac{z_{ef}}{z_L} \right) + 75 \left(\frac{z_{ef}}{z_L} \right)^2 \right]^{-1/3}, \frac{z_{ef}}{z_L} < 0$$

Długość z_L wyznacza się z zależności:

$$z_L = 0,29 u_x^2 \frac{T}{T_x} \quad (9)$$

gdzie:

u_x - prędkość tarciova

T_x - skala temperatury

T - temperatura powietrza

Ponieważ u_x i T_x są ze sobą powiązane poprzez długość Obuchova z_L , to układ równań (7); (8) i (9) należy rozwiązać iteracyjnie. W efekcie dysponując parametrami u_x i T_x obliczonymi numerycznie, możemy oszacować bezwzględne wartości strumienia ciepła jawnego

$$Q_H = \rho c_p \cdot u_x \cdot T_x$$

4. PARAMETRY AERODYNAMICZNE PODŁOŻA W OBSZARACH ZABUDOWANYCH

Przyjęcie efektywnej wysokości pomiarów z_{ef} w obszarach zurbanizowanych wiąże się z pewnymi trudnościami. Decyduje o tym niejednorodna powierzchnia i zróżnicowana wysokość zabudowy. W literaturze możemy spotkać różne propozycje wyznaczania uśrednionych parametrów aerodynamicznych podłoża, takich jak współczynnik szorstkości – z_o czy wysokość przesunięcia zerowego z_d . O ile oszacowanie wysokości zabudowy nie stanowi większego problemu, to poprawne oszacowanie z_o i z_d jest bardziej złożone i w zasadniczy sposób wpływa na wartość z_{ef} .

W pracy przyjęto metodę określania współczynnika z_o wg [1]

$$z_o = (h - z_d) \exp \left[- \frac{\kappa}{\sqrt{0,5 \cdot C_{Dh}} \cdot \lambda_F} \right] \quad (10)$$

gdzie:

h - średnia wysokość budynków,

κ - stała von Kármána (0,4),

C_{Dh} - współczynnik oporu pojedynczej przeszkody (0,8),

λ_F - gęstość powierzchni czołowej.

$$\lambda_F = \sum_{i=1}^n A_{Fi} / A_T \quad (11)$$

A_F - powierzchnia czołowa poszczególnych budynków,

A_T - całkowita powierzchnia rozpatrywanego obszaru zabudowy,

z_d - przemieszczenie płaszczyzny zerowej [m].

Zależność na określenie przemieszczenia płaszczyzny zerowej dla regularnej grupy budynków przyjęto wg. [1]:

$$z_d = h(\lambda_p)^{0,6} \quad (12)$$

gdzie:

λ_p - wskaźnik gęstości zabudowy,

h - średnia wysokość budynków

Wskaźnik $\lambda_p = A_p / A_T$, gdzie A_T jest ogólną powierzchnią rozpatrywanego obszaru zabudowy a A_p jest sumą powierzchni budynków A_{pi} $i=1,2,3..n$ znajdujących się na powierzchni A_T .

Średnią wysokość budynków określamy ze wzoru:

$$h = \frac{\sum_{i=1}^n V_i h_i}{\sum_{i=1}^n V_i} \quad (13)$$

gdzie:

V_i - kubatura budynków

h_i - wysokość budynków

5. PODSTAWOWE PARAMETRY TURBULENCJI I METODA ICH WYZNACZANIA

Parametrem często stosowanym w opisie turbulencji jest parametr struktury optycznej, który jest miarą amplitudy fluktuacji współczynnika załamania n i skali wewnętrznej l_o , będącej skalą, w której energia kinetyczna turbulencji ulega dyssypacji.

Standardowe metody pomiaru wewnętrznej skali turbulencji bazują na scyntytacji laserowej, która jest wielkością związaną z amplitudą. Metody te mają zastosowanie w przypadku ścieżek o długości powyżej 100m.

W przypadku krótkich ścieżek światła laserowego stosowane są metody oparte na wielkościach związanych z fazą. Przydatność ich została potwierdzona w pracach [3],[5],[6],[7], gdzie podkreślono wykorzystanie fluktuacji bocznych wąskiej wiązki laserowej.

W pracy proponuje się wprowadzenie do rozważań kąt wychylenia wiązki θ . Składową poziomą i pionową kąta wychylenia θ_1 i θ_2 uzyskujemy, jako pochodną fazowej funkcji strukturalnej, stąd kwadrat średniego kąta wychylenia może być przedstawiony, jako zależność

$$\langle \theta_{x1} \rangle^2 = \langle \theta_{x2} \rangle^2 = 1,10 C_n^2 L l_o^{-1/3} \quad (14)$$

a średnią kwadratową fluktuacji kąta wychylenia wiązki laserowej σ_θ^2 zapiszemy w postaci

$$\sigma_\theta^2 = 8,2 \cdot 10^{-8} C_n^2 L^3 l_o^{-7/3} \quad (15)$$

gdzie:

$$\sigma_\theta^2 = \langle \theta^2 \rangle - \langle \theta \rangle^2$$

Wyrażenie na skalę wewnętrzną l_o w obrębie optyki geometrycznej $l_o^2 \geq \lambda L$ zapiszemy

$$l_o = 0,273 \cdot 10^{-3} L \sqrt{\frac{\langle \theta_1 \rangle^2}{\sigma_\theta^2}} \quad (16)$$

W przypadku, kiedy długość ścieżki L zawiera się w przedziale $l_o^2/\lambda < L \leq l_o^4/\lambda^3$, to wyrażenie na kwadrat średniego kąta wychylenia i średnia kwadratowa fluktuacji kąta wychylenia ma postać

$$\langle \theta_1 \rangle^2 = \langle \theta_2 \rangle^2 = 0,60 C_n^2 L l_o^{-1/3} \quad (17)$$

$$\sigma_\theta^2 = 5,2 \cdot 10^{-9} C_n^2 L^{-11/6} k_\lambda^{7/6}$$

Wyrażenie na skalę wewnętrzną ma postać

$$l_o = 1,5 \cdot 10^{24} k_\lambda^{-7/2} L^{-5/2} \left[\frac{\sigma_\theta^2}{\langle \theta_1 \rangle^2} \right]^3 \quad (18)$$

Równania wiążące skalę wewnętrzną l_o z wielkościami szybkości dyssypacji możemy przedstawić w postaci

$$\dot{\epsilon} = \frac{7,4^4 v_t^3}{l_o^4} \quad (19)$$

gdzie:

v_t - turbulentna lepkość kinematyczna [m^2/s],

$\dot{\epsilon}$ - szybkość dyssypacji energii kinetycznej turbulencji [m^2/s^3].

6. PRZYBLIŻONA OCENA STRUMIENIA CIEPŁA JAWNEGO DLA OBSZARU ZABUDOWANEGO PRZY WYKORZYSTANIU BADAŃ MODELOWYCH

Korzystając z teorii podobieństwa przepływów ustalone zostały istotne dla przyjętego eksperymentu podobieństwa częściowe. Zapewnienie całkowitego podobieństwa w przepływach o nieustalonym charakterze jest niemożliwe do spełnienia.

W tej sytuacji zdecydowano się na podobieństwo częściowe, przyjmując kryterium podobieństwa zjawisk okresowych oraz warunek podobieństwa wynikającego z równania na energię kinetyczną turbulencji, przy uwzględnieniu członu związanego z produkcją energii kinetycznej turbulencji.

Powyższe warunki podobieństwa mają postać

$$\frac{K_L}{K_t K_U} = 1 \quad \text{oraz} \quad \frac{K_{Gb}}{K_\rho} \cdot \frac{K_t}{K_U^2} = 1 \quad (20)$$

Należy, zatem spełnić warunki podobieństwa w postaci liczb kryterialnych

$$H_o = \frac{l}{U_t} \quad \text{oraz} \quad G_{kl} = \frac{g \beta v T_x t}{U_t^2} \quad (21)$$

W dalszej części zostaną przedstawione przykłady badań modelowych przy zastosowaniu wiązki światła laserowego zachowując przedstawione powyżej kryteria podobieństwa. Badania zostały przeprowadzone przy temperaturze $T = 292K$ przyjmując skale: geometryczną, prędkości, czasu i gradient temperatury na poziomie $K_L = 100$, $K_U = 2$, $K_t = 50$, $K_{Tx} = 8$.

Równocześnie założono, że przyspieszenie ziemskie g , współczynnik lepkości kinetycznej ν oraz współczynnik rozszerzalności β w badaniu modelowym, jak i w skali rzeczywistej są równe. Profil prędkości przyjęto, jako logarytmiczny, prędkość na wysokości $z = 0,10m$ kształtowała się na poziomie $U_{z=0,10} = 1,49m/s$ przy szorstkości powierzchni $z_o \cong 0,0002m$.

Wywołanie efektu turbulencji termicznej w badaniu modelowym nastąpiło w wyniku odpływu strumienia ciepła z powierzchni podłoża na poziomie $8W/m^2$.

Przyjęty poziom gęstości strumienia ciepła miał modelować wielkość natężenia promieniowania słonecznego w skali rzeczywistej na poziomie $R_{st} = 252W/m^2$.

Obserwacje fluktuacji gęstości strumienia powietrza prowadzono na wysokości $z = 0,10\text{m}$ wykorzystując układ elektro – optyczny.

W wyniku przeprowadzonych pomiarów kąta wychylenia wiązki światła laserowego oraz jego fluktuacji możliwe było wyznaczenie współczynnika struktury optycznej C_n^2 .

Kolejnym krokiem było określenie współczynnika struktury termicznej C_T^2 .

Na podstawie zależności (6) można stwierdzić, że przy współczynniku struktury optycznej na poziomie

$$C_n^2 = 0,134 \cdot 10^{-12}$$

Współczynnik struktury termicznej osiąga wielkość $C_T^2 = 0,156$

Zakładając logarytmiczny profil prędkości i przyjmując wcześniej podane dane $z_o = 0,0002\text{m}$, $U_{z=0,10} = 1,49\text{m/s}$ otrzymujemy prędkość tarciovą na poziomie $u_x \cong 0,096\text{m/s}$. Długość Monina - Obuchova z_L zgodnie z zależnością (9) zapiszemy

$$z_L = 0,29 \cdot 0,096^2 \cdot \frac{292}{T_x}$$

a parametr z/z_L możemy zapisać

$$z/z_L = \frac{0,10}{0,29 \cdot 0,096^2 \frac{292}{T_x}} = 0,13T_x$$

Funkcję $f_T(z/z_L)$ dla warunków chwiejnych zapiszemy:

$$f\left(\frac{z}{z_L}\right) = 4[1 - 7(0,13T_x) + (0,13T_x)^2]^{-1/3}$$

Równanie (7) możemy przedstawić w postaci:

$$0,0186T_x^{-2} = 4[1 - 7(0,13T_x) + (0,13T_x)^2]^{-1/3}$$

stąd skala temperatury $T_x = 0,069\text{K}$

Dysponując parametrami u_x i T_x możemy oszacować wielkość strumienia ciepła jawnego

$$Q_H = 1210,5 \cdot 0,069 \cdot 0,096 = 8,0\text{W/m}^2$$

Przedstawiony powyżej przykład dotyczył prostego wariantu. Interesujący jest przypadek, w którym mamy do czynienia z obszarem zabudowanym.

Podstawowe parametry aerodynamiczne podłoża określono korzystając z zależności dla z_o i z_d wg. [1].

Wyznaczono wskaźnik gęstości zabudowy $\lambda_p = 0,10$, a uśredniona wysokość obiektów $h = 0,12\text{m}$. Korzystając ze wzoru (12) określono wysokość przemieszczenia płaszczyzny zerowej $z_d = 0,03\text{m}$.

Współczynnik szorstkości z_o dla rozpatrywanego obszaru wyznaczono korzystając z zależności (10) i uzyskano wielkość $z_o = 0,015\text{m}$

Wskaźnik gęstości pola napływu dla rozważanego kierunku napływu wiatru (obszar zabudowany) $\lambda_F = 0,12$

Założono, że napływ wiatru ma miejsce od strony terenu płaskiego niezabudowanego, gdzie prędkość na poziomie $z = 0,10\text{m}$ osiąga wartość $U_{z=0,10} = 1,49\text{m/s}$, zaś na $z = 0,35\text{m}$, $U_{z=0,35} = 1,75\text{m/s}$, natomiast prędkość tarciovą $u_x = 0,096\text{m/s}$.

Korzystając z zależności [12] wiążącej ze sobą profile prędkości dwóch terenów wynika, że prędkość tarciovą w terenie zabudowanym może być szacowana na poziomie $u_x = 0,13\text{m/s}$.

Długość Monina – Obuchova zapiszemy w postaci:

$$z_L = 0,29 \cdot 0,13^2 \cdot \frac{292}{T_x} = \frac{1,43}{T_x}$$

a parametr

$$z/z_L = 0,35 \left(\frac{1,43}{T_x}\right)^{-1} = 0,24T_x$$

Ostatecznie równanie (7) zapiszemy w postaci

$$0,049 \cdot 0,35^{2/3} T_x^{-2} = 4[1 - 7(0,24 \cdot T_x) + 75(0,24 \cdot T_x)^2]^{-1/3}$$

Rozwiązaniem równania jest skala temperatury na poziomie $T_x = 0,059\text{K}$

Znając prędkość tarciovą u_x i skalę temperatury T_x możemy oszacować wielkość strumienia ciepła jawnego dla obszaru o założonej strukturze zabudowy

$$Q_H = 1210,5 \cdot 0,13 \cdot 0,059 = 9,4\text{W/m}^2$$

Uwzględniając przyjęte w badaniach modelowych skale podobieństwa strumień ciepła w warunkach rzeczywistych kształtuje się na poziomie $Q_H = 150\text{W/m}^2$

7. PODSUMOWANIE

Przedstawiona w pracy metoda może być przydatna przy analizach obszarowych charakterystyk turbulencyjnego strumienia ciepła jawnego dla wybranych obszarów miejskich. Uzyskane w ten sposób dane mogą być wykorzystane do bezpośredniej oceny bilansu cieplnego, weryfikacji modeli numerycznych jak również mogą stanowić informację wyjściową przy tworzeniu map topoklimatycznych miasta. Mapy tego typu stają się w ostatnich latach przydatnym narzędziem w pracach planistycznych. Dzięki szczegółowym informacjom na temat warunków mikroklimatu możliwa jest między innymi ochrona terenów szczególnie podatnych na zmiany klimatyczne.

W przyszłości istotnym krokiem byłoby porównanie uzyskanych wyników z badaniami w skali naturalnej przeprowadzonymi w oparciu o podobną metodę pomiarową.

APPLICATION OF MODEL TESTS IN THE ASSESSMENT OF SURFACE SENSIBLE HEAT FLUXES

Summary: The paper presents an assessment method of surface sensible heat fluxes. The study was conducted in wind tunnel with assumed similarity scales: $K_L = 100$, $K_U = 2$, $K_{Tx} = 8$ and $K_t = 50$. Laser beam was used to record turbulent air flow over modeled built area. Refractive index structure parameter allows determination of the temperature structure parameter. Friction velocity and Monin – Obuchow function were determined assuming logarithmic velocity profile. Obtained data allowed estimation of temperature scale and magnitude of sensible heat fluxes.

Literatura

- [1] Bottema M., Mestayer P.G. *Urban roughness mapping – validation techniques and some first results*. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 74-76 (1998) 233-243
- [2] Businger J.A. et al. *Flux profile relationships in the atmospheric surface layer*. Journal of Atmospheric Science 28 (1971) 788 - 794
- [3] Consortini A., Sun Y.Y., Li Z.P., Conforti G. *A mixed method for measuring the inner scale of atmospheric turbulence*. Journal of Modern Optics, vol.37, No. 10, (1990) 1555-1560
- [4] Fortuniak K. *Radiacyjne i turbulencyjne składniki bilansu cieplnego terenów zurbanizowanych na przykładzie Łodzi*. Wydawnictwo Uniwersytetu Łódzkiego, Łódź (2010) 232s.
- [5] Klemm K. *O możliwości wykorzystania wiązki światła laserowego do oceny podstawowych parametrów turbulencji optycznej za pomocą dwóch różnych podejść*. Fizyka Budowli w Teorii i Praktyce, Tom III (2008) 35-42
- [6] Klemm K., Pieszyński K., Roźniakowski K. *Badanie przepływu powietrza o nieustalonym polu gęstości z wykorzystaniem wiązki laserowej*. Fizyka Budowli w Teorii i Praktyce Tom III (2008) 43-48
- [7] Klemm K. *Kompleksowa ocena warunków mikroklimatu w luźnych i zwartych strukturach urbanistycznych*. Polska Akademia Nauk Komitet Inżynierii Lądowej i Wodnej, studia z zakresu inżynierii, Nr 75 (2011) 172 s.
- [8] Panofsky H.A. Tower micrometeorology. Workshop on Micrometeorology D.A. Haugen (ed) American Meteorology Society, Boston, (1972) 151 – 176
- [9] Petersen E.L., Troen I., Wieringa J. *Development of a method for wind climate analysis for non – mountainous terrain in Europe*. Proc. of European Wind Energy Conference, Hamburg, (1984) 6 – 12
- [10] Schotz S., Panofsky H.A. *Wind characteristics at the boulder atmospheric observatory*. Boundary Layer Meteorology 19 (1980) 155 – 164
- [11] Simiu E. *Equivalent static wind load for tall buildings design*. Proc. of the 4-th International Conference on Wind

Effects on Buildings and Structures, Heathrow (1977) 721 – 735

[12] Simiu E., Scanlan R.H. *Wind effects on structures*, Third ed., Wiley, New York (1996)

[13] Wyngaard J.C., Izumi Y., Collins S.A. *Behavior of refractive – index- structure parameter near the ground*. L. Opt. Soc. Amer., 61(1971) 1646-1650