

Dwurównaniowe domknięcie turbulentnego strumienia ciepła

Implementacja modelu:

$$k - \varepsilon - \overline{v'^2} - f - \overline{\theta'^2} - \varepsilon_\theta$$

Michał Karcz

KONFERENCJA CFD

Zaawansowane Modele Numerycznej Termomechaniki Płynów - Zastosowania w Przemysle
25 październik 2002 Warszawa

Motywacje

- Modelowanie przepływów dyfuzorowych z oderwaniem
- Modelowanie przepływów z wymianą ciepła - stany nieustalone
- Więcej informacji o strukturze przepływu
- Zbadanie możliwości programu **FLUENT** pod względem implementacji modeli niestandardowych poprzez **UDF**

Koncepcja modelu

- Składowa prędkości normalna do ścianki odpowiada zarówno za turbulentny transport pędu jak i ciepła
- Eliminacja funkcji tłumiących związanych z geometrią
- Efektywny współczynnik transportu ciepła nie musi być bezpośrednio związany z lepkością turbulentną
- Połączenie 4-równaniowego modelu turbulencji dynamicznej **Durbina** z 2-równaniowym modelem turbulencji termicznej **Deng-Wu-Xi**

Model Durbina

$$(1) \quad \frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho v_j k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k - \epsilon$$

$$(2) \quad \frac{\partial}{\partial t} (\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho v_j \epsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{C_{\epsilon 1} P_k - C_{\epsilon 2} \epsilon}{T}$$

$$(3) \quad \frac{\partial}{\partial t} (\rho \overline{v'^2}) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho v_j \overline{v'^2}) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \mu_t) \frac{\partial \overline{v'^2}}{\partial x_j} \right] + kf - \frac{\epsilon}{k} \overline{v'^2}$$

$$(4) \quad f = L^2 \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial f}{\partial x_j} \right) + \frac{C_1}{T} \left[\frac{2}{3} - \frac{\overline{v'^2}}{k} \right] + C_2 \frac{P_k}{k}$$

$$L = C_L \max \left[\frac{k^{3/2}}{\epsilon}, C_\eta \left(\frac{\nu^3}{\epsilon} \right)^{\frac{1}{4}} \right]$$

$$\nu_t = \frac{\mu_t}{\rho} = C_\mu \overline{v'^2} T$$



$$T = \max \left[\frac{k}{\epsilon}, 6 \sqrt{\frac{\nu}{\epsilon}} \right]$$

Wartości stałych w modelu **Durbina**

$$C_\mu = 0.22, \quad C_1 = 0.4, \quad C_2 = 0.3, \quad C_L = 0.25, \quad C_\eta = 85, \quad C_{\epsilon 2} = 1.9, \quad \sigma_\epsilon = 1.3$$

$$C_{\epsilon 1} = 1.4 \left(1 + 0.045 \sqrt{\frac{k}{v'^2}} \right)$$

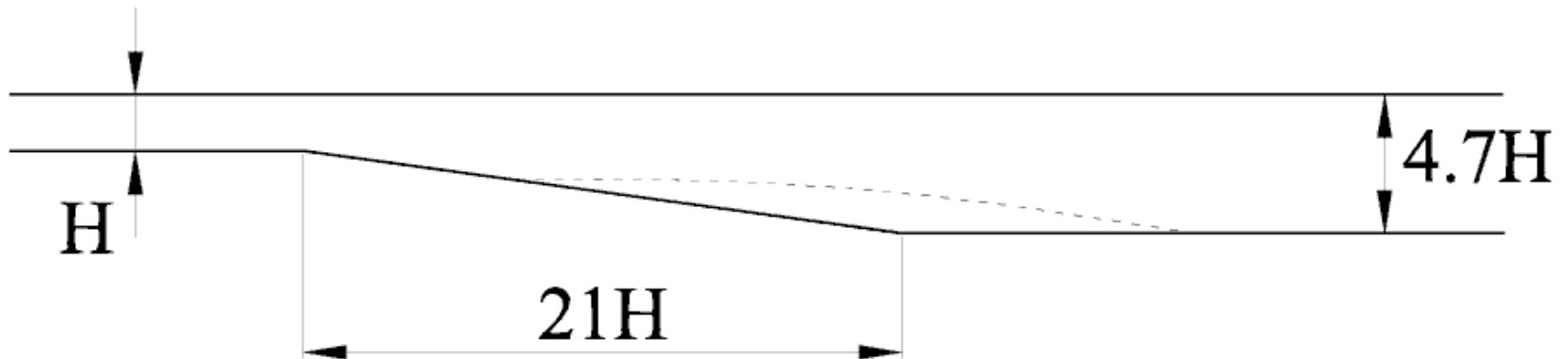
Warunki brzegowe na ścianie w modelu **Durbina**

$$k_w = 0, \quad \epsilon = \frac{2\nu k_1}{y_1^2}, \quad \overline{v^2} = 0, \quad f_w = -\frac{20\nu^2 \overline{v^2}}{\epsilon_w y_1^4}$$

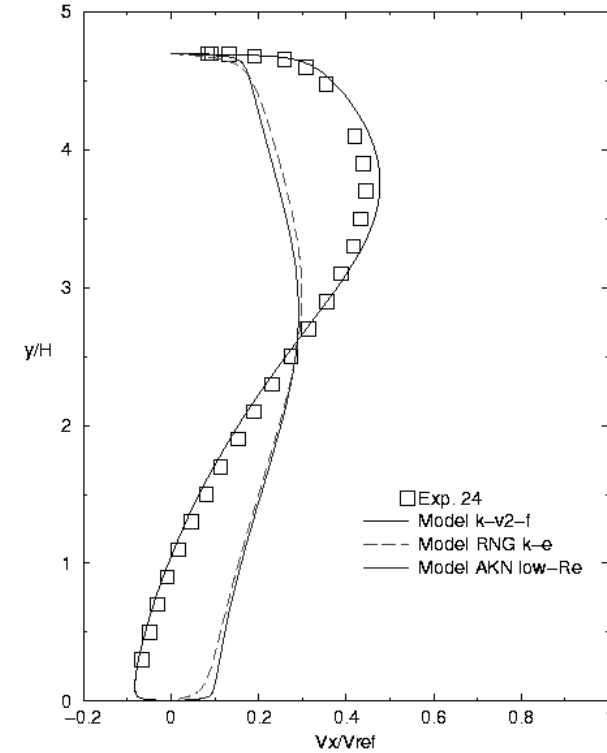
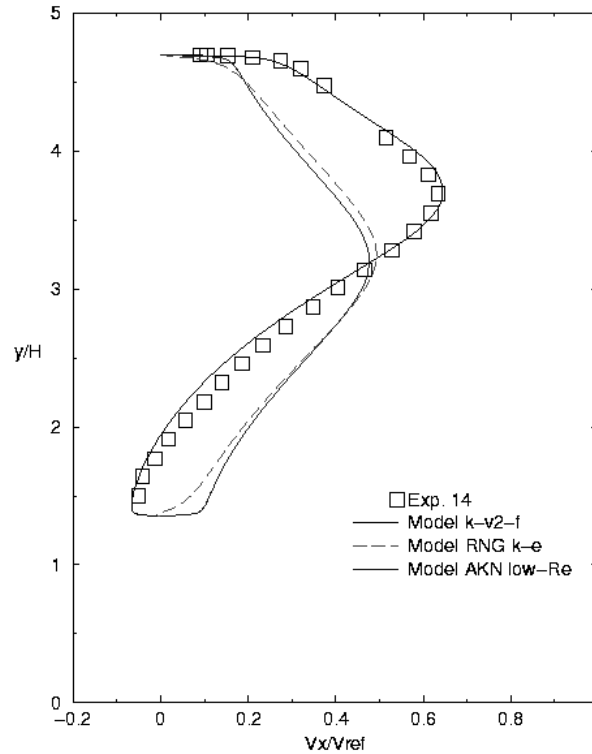
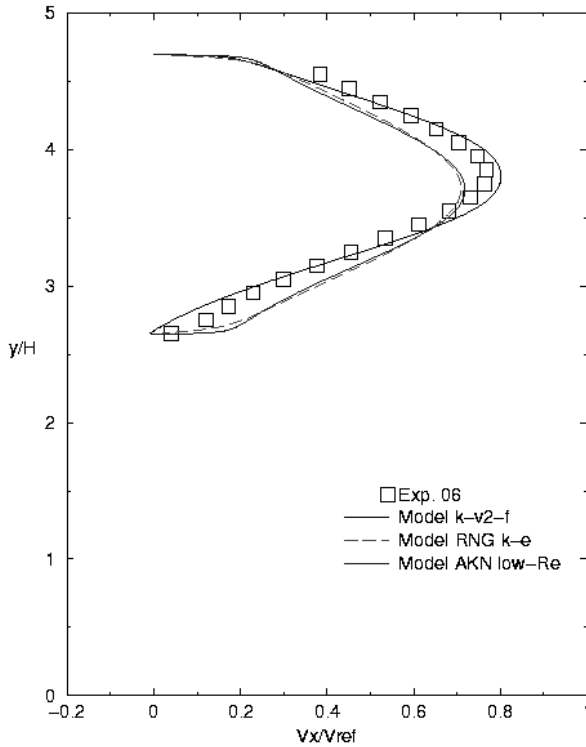
Obliczenia z zaimplementowanym modelem **Durbina** Przepływ bez wymiany ciepła

$$k - \varepsilon - \overline{v'^2} - f$$

Przykład 1 - dyfuzor niesymetryczny



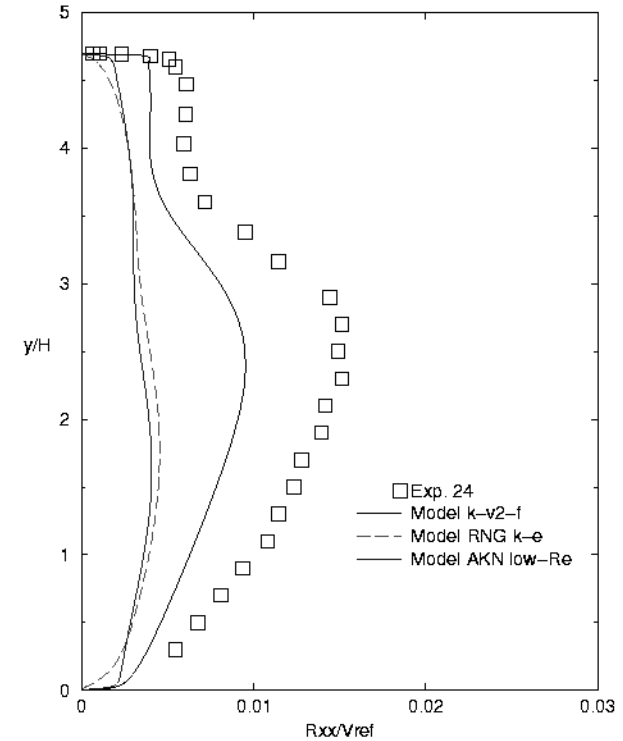
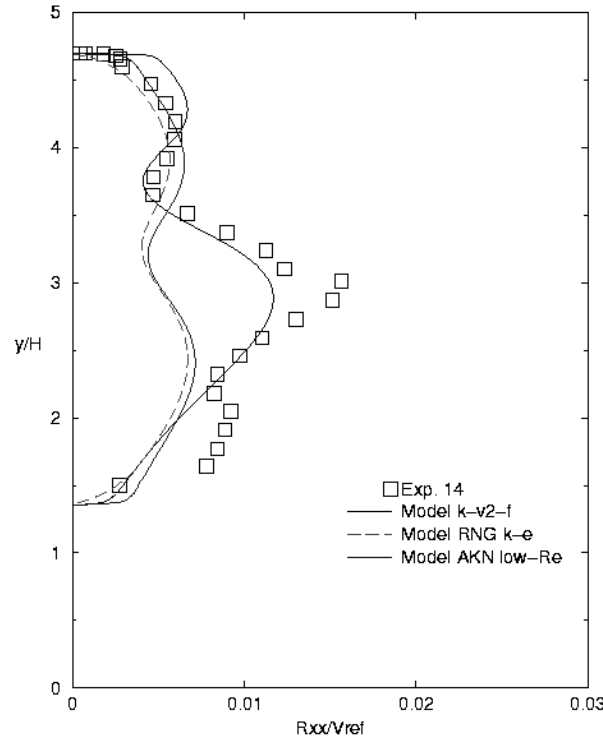
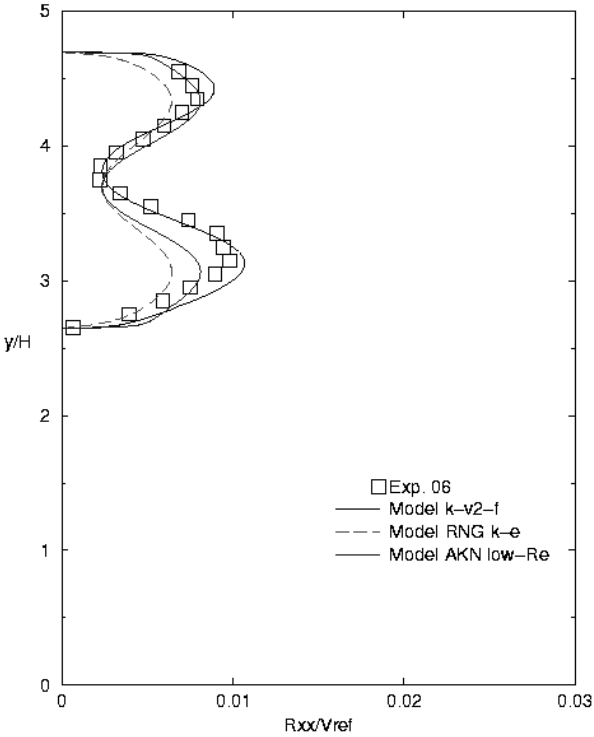
- Eksperyment - Test Case ERCOFTAC wg Obi (1993) oraz Buice & Eaton (1997)
- Model 2D
- Siatka strukturalna (100 x 300) $y^+ < 1$
- Metoda SIMPLEC oraz schematy II rzędu
- Przepływ rozwinięty na wlocie $Re = 20000$
- Lepkość molekularna dla powietrza wg formuły Sutherlanda



KONFERENCJA CFD

Zaawansowane Modele Numerycznej Termomechaniki Płynów - Zastosowania w Przemysle

25 październik 2002 Warszawa

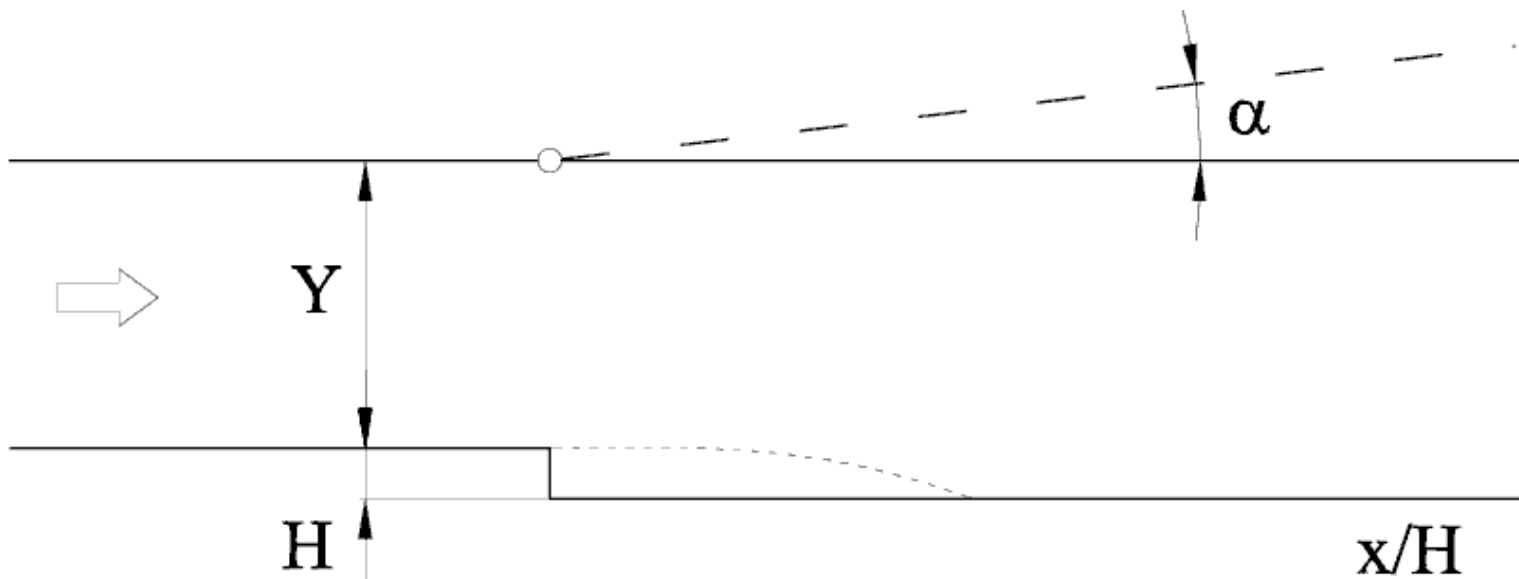


KONFERENCJA CFD

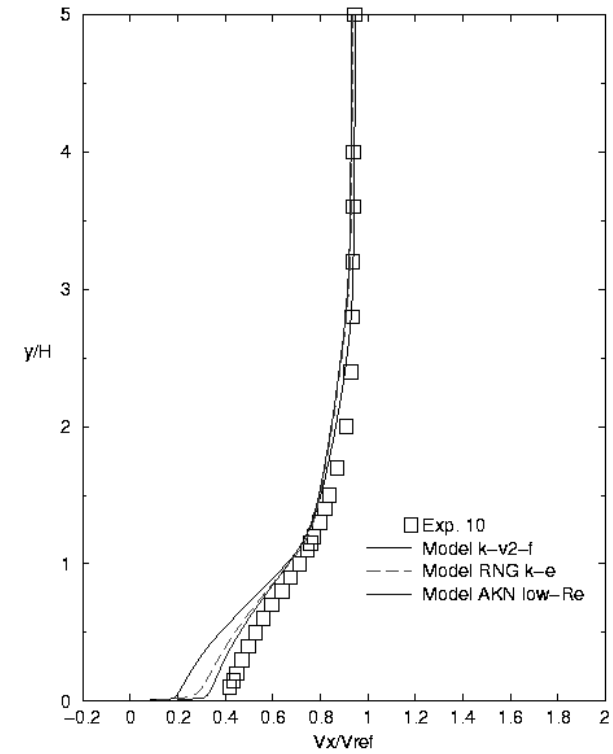
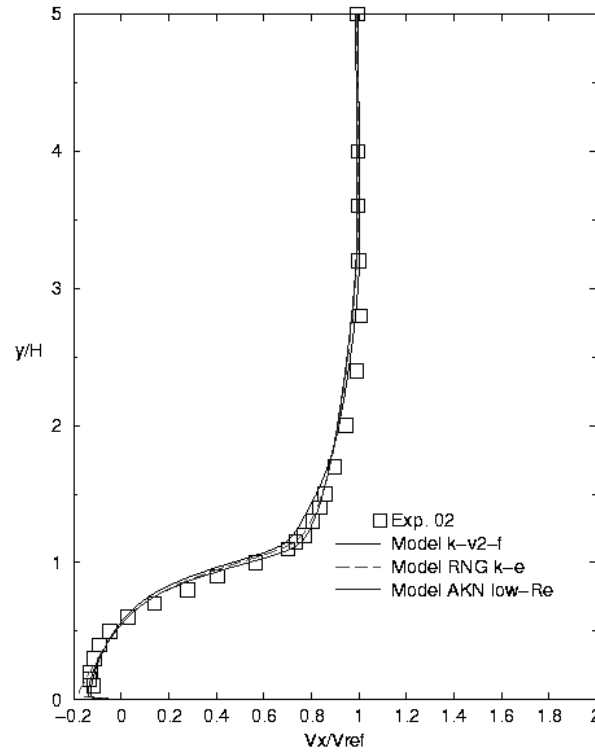
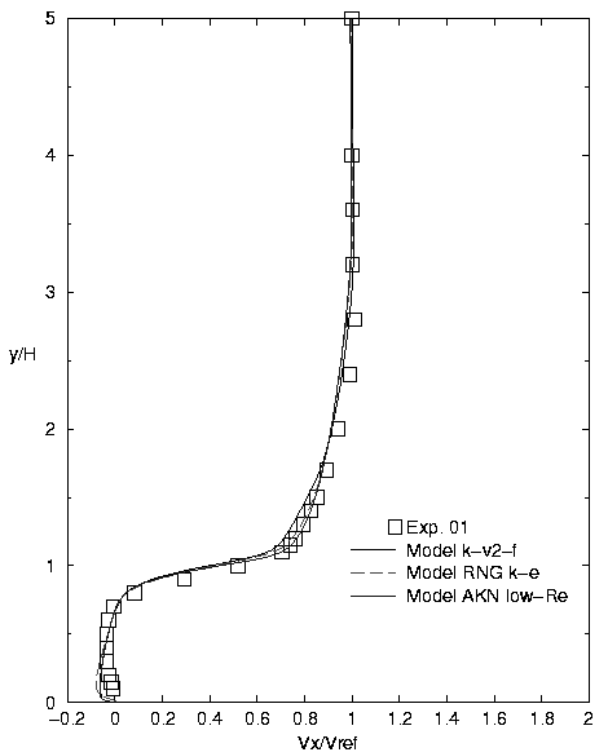
Zaawansowane Modele Numerycznej Termomechaniki Płynów - Zastosowania w Przemysle

25 październik 2002 Warszawa

Przykład 2 - kanał z uskokiem

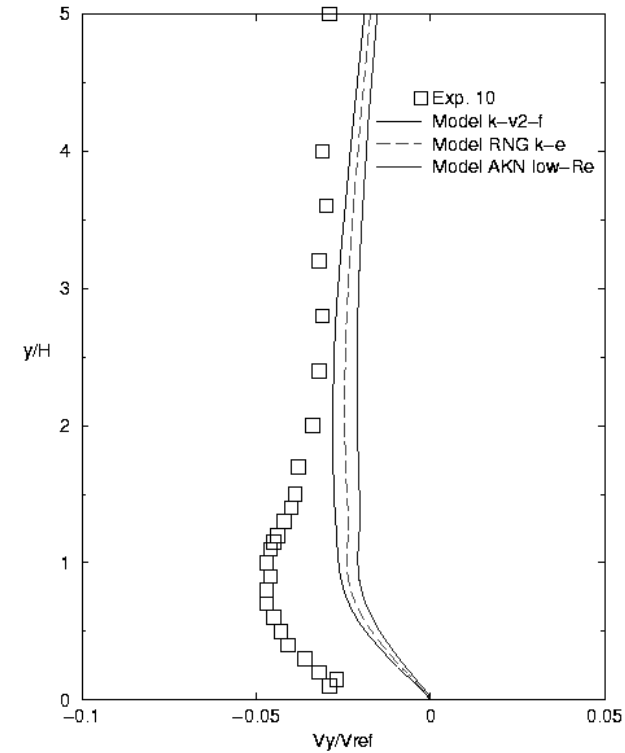
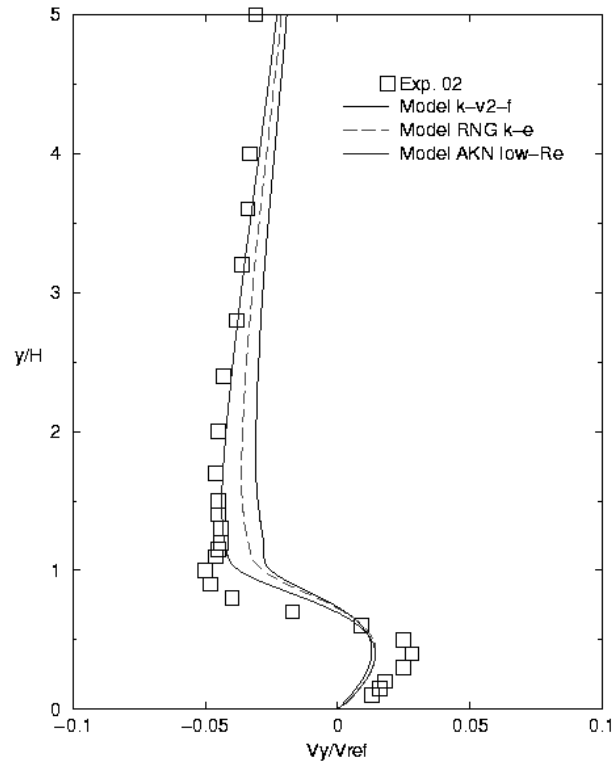
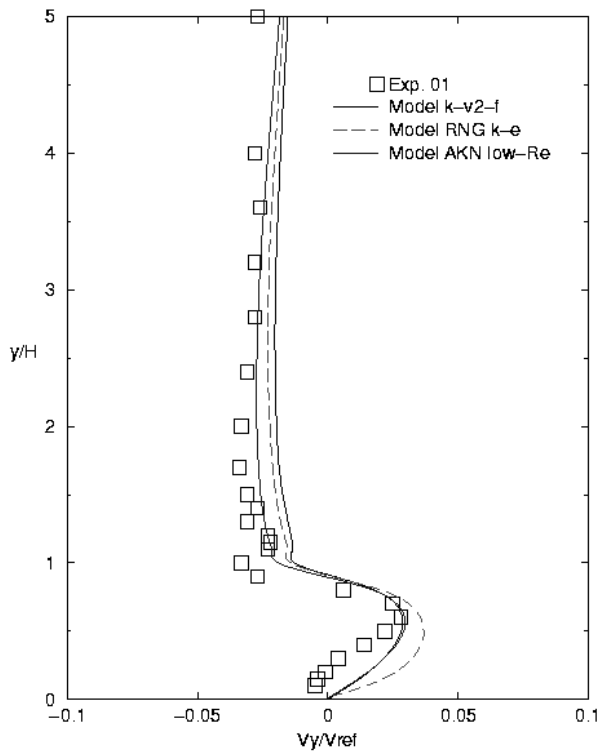


- Eksperyment - Test Case ERCOFTAC wg Driver & Seegmiller (1985)
- Model 2D
- Siatka strukturalna (105 x 125) $y^+ < 1$
- Metoda SIMPLEC oraz schematy II rzędu
- Przepływ rozwinięty na wlocie $Re = 28000$
- Lepkość molekularna wg formuły Sutherlanda



KONFERENCJA CFD

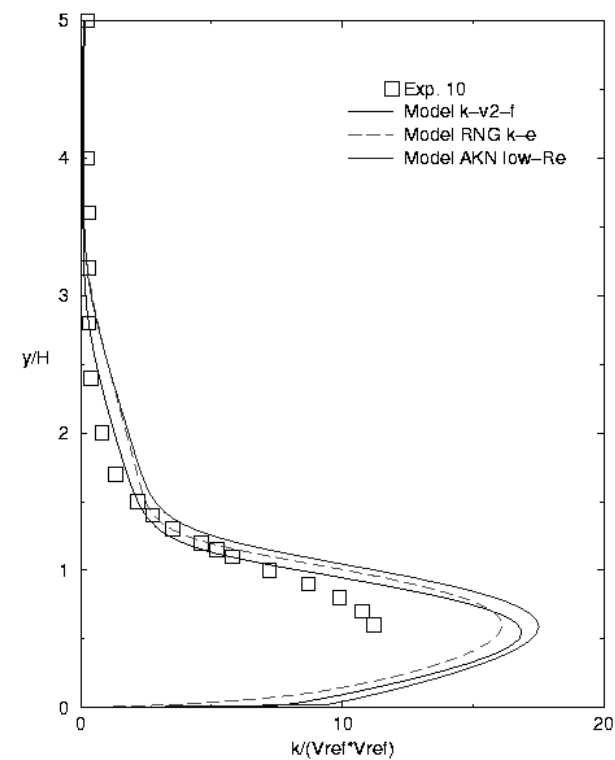
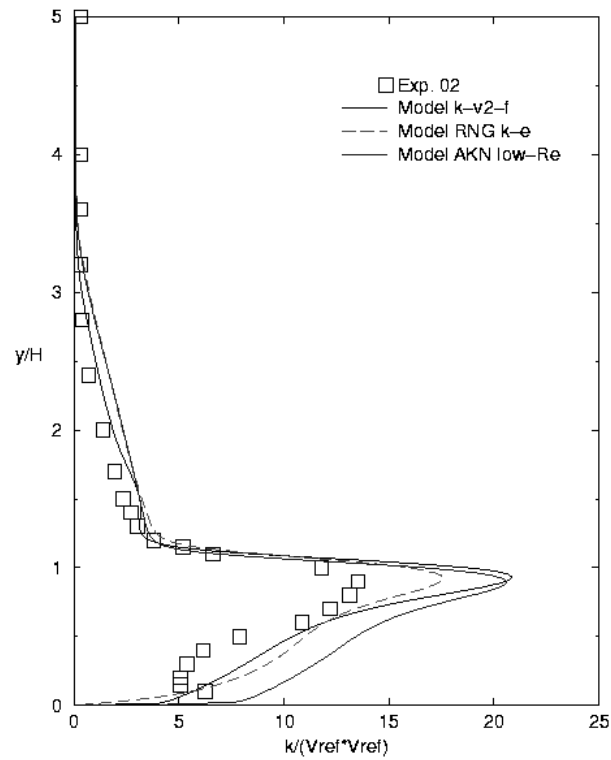
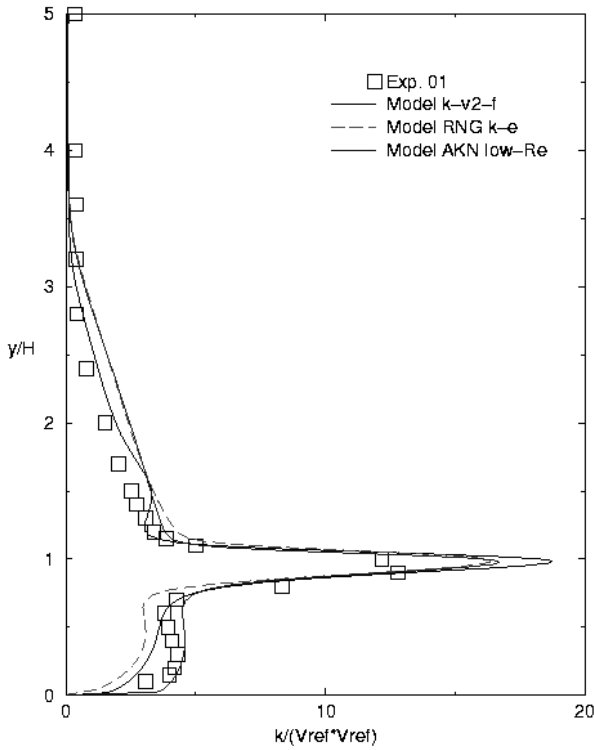
Zaawansowane Modele Numerycznej Termomechaniki Płynów - Zastosowania w Przemysle
25 październik 2002 Warszawa



KONFERENCJA CFD

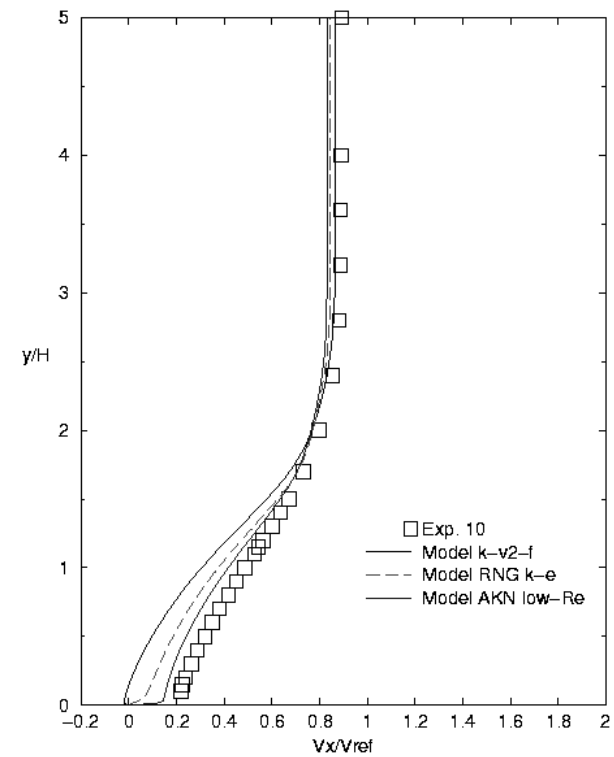
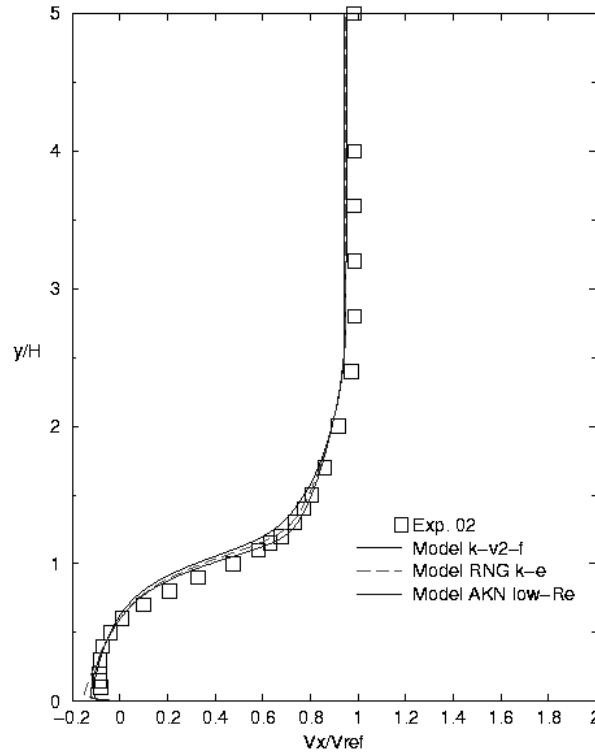
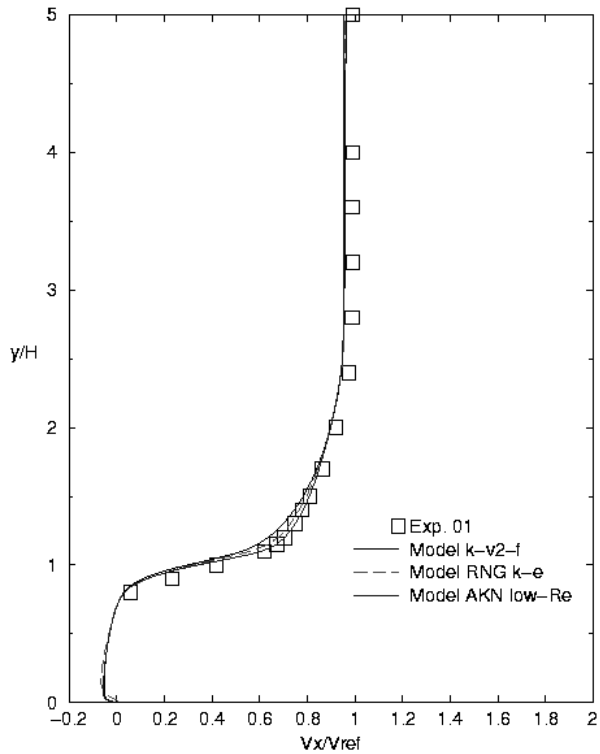
Zaawansowane Modele Numerycznej Termomechaniki Płynów - Zastosowania w Przemysle

25 październik 2002 Warszawa



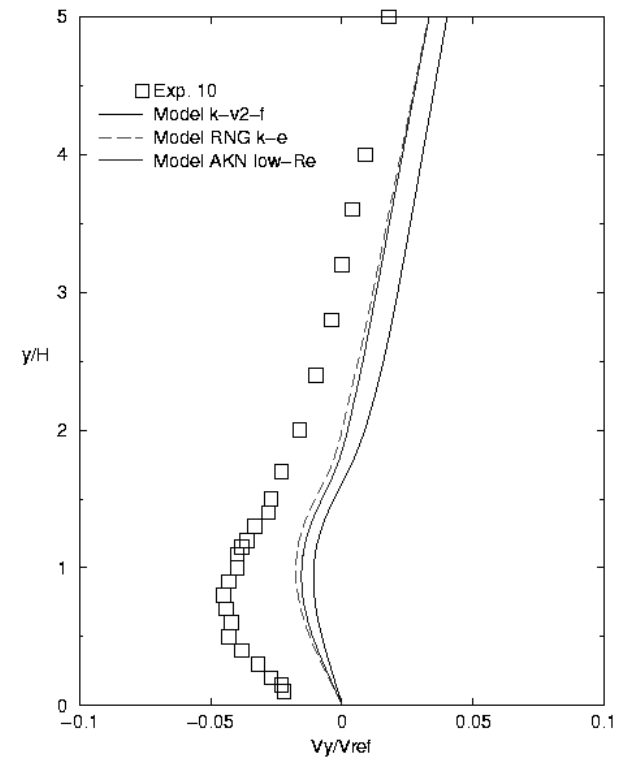
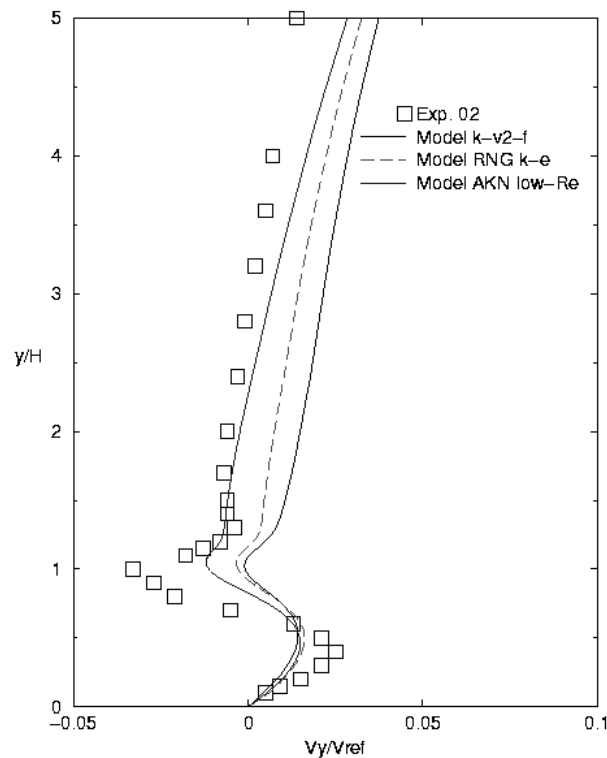
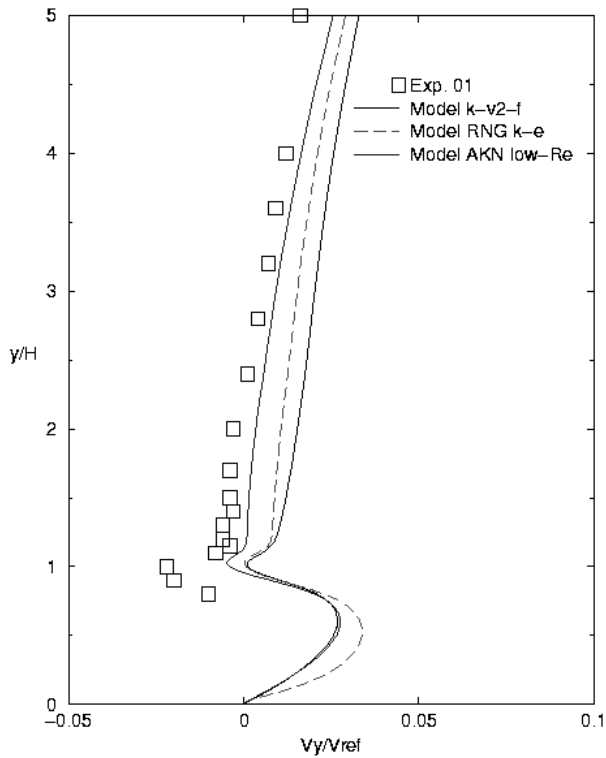
KONFERENCJA CFD

Zaawansowane Modele Numerycznej Termomechaniki Płynów - Zastosowania w Przemysle
25 październik 2002 Warszawa



KONFERENCJA CFD

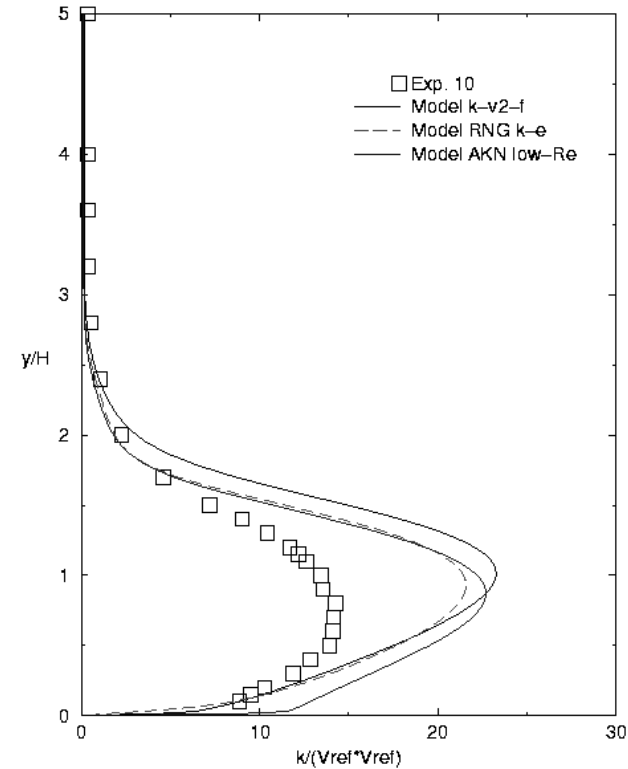
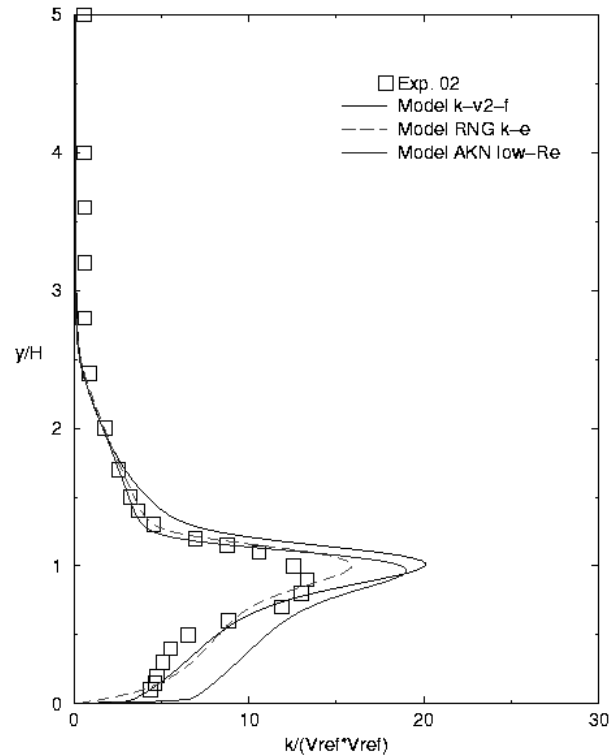
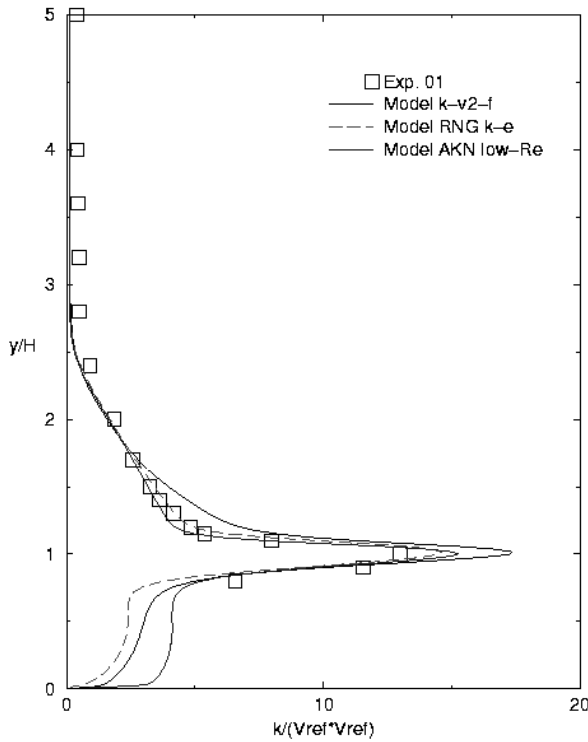
Zaawansowane Modele Numerycznej Termomechaniki Płynów - Zastosowania w Przemysle
25 październik 2002 Warszawa



KONFERENCJA CFD

Zaawansowane Modele Numerycznej Termomechaniki Płynów - Zastosowania w Przemysle

25 październik 2002 Warszawa



KONFERENCJA CFD

Zaawansowane Modele Numerycznej Termomechaniki Płynów - Zastosowania w Przemysle

25 październik 2002 Warszawa

Równanie energii

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho e) + \frac{\partial}{\partial x_i} [(\rho e + p) v_i] = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\frac{\lambda}{C_p} + \frac{\lambda_t}{C_p} \right) \frac{\partial \theta}{\partial x_i} + \tau_{ij}^e v_j \right] + \rho S_e$$

Turbulentny współczynnik transportu ciepła

Domknięcie algebraiczne



$$\alpha_t = \frac{\lambda_t}{\rho C_p} = \frac{\nu_t}{Pr_t}$$

Domknięcie 2-równaniowe



$$\alpha_t = \frac{\lambda_t}{\rho C_p} = C_\lambda \overline{v^2} T_t$$

Zmodyfikowany model Deng-Wu-Xi

$$(5) \quad \frac{\partial}{\partial t} (\rho \overline{\theta'^2}) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho v_j \overline{\theta'^2}) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\alpha + \frac{\alpha_t}{\sigma_{\theta'^2}} \right) \frac{\partial \overline{\theta'^2}}{\partial x_j} \right] + 2P_{\theta'^2} - 2\epsilon_{\theta'^2}$$

$$(6) \quad \frac{\partial}{\partial t} (\rho \epsilon_\theta) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho v_j \epsilon_\theta) =$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\alpha + \frac{\alpha_t}{\sigma_{\epsilon_\theta}} \right) \frac{\partial \epsilon_\theta}{\partial x_j} \right] +$$

$$C_{p1} \sqrt{\frac{\epsilon \epsilon_\theta}{k \theta'^2}} P_{\theta'^2} - C_{d1} \epsilon_\theta \frac{\epsilon_\theta}{\theta'^2} - C_{d2} \epsilon \frac{\epsilon_\theta}{\theta'^2}$$

$$\alpha_t = C_\lambda \overline{v'^2} T_t$$



$$T_t = \frac{k^l \overline{\theta'^2}^m}{\epsilon \epsilon_\theta} \quad l + m = 1$$

Wartości stałych w zmodyfikowanym modelu **DWX**

$$C_\lambda = 0.23, \quad C_{p1} = 2.75, \quad C_{d1} = 2.1, \quad C_{d2} = 0.9,$$

$$l = 1.5, \quad m = -0.5 \quad \sigma_{\epsilon_\theta} = 1.0, \quad \sigma_{\overline{\theta'^2}} = 1.0$$

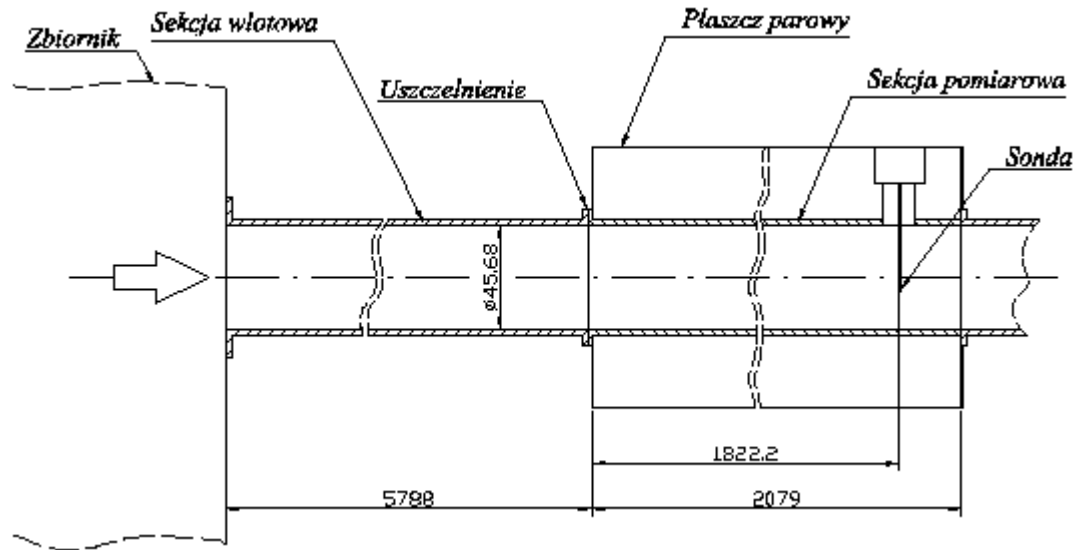
Warunki brzegowe w zmodyfikowanym modelu **DWX**

$$\overline{\theta'^2} = 0, \quad \epsilon_\theta = \alpha \frac{\overline{\theta_1'^2}}{y_1^2}$$

Obliczenia z zaimplementowanym
modelem **6-równaniowym**
Przepływ z wymianą ciepła

$$k - \varepsilon - \overline{v'^2} - f - \overline{\theta'^2} - \varepsilon_{\theta}$$

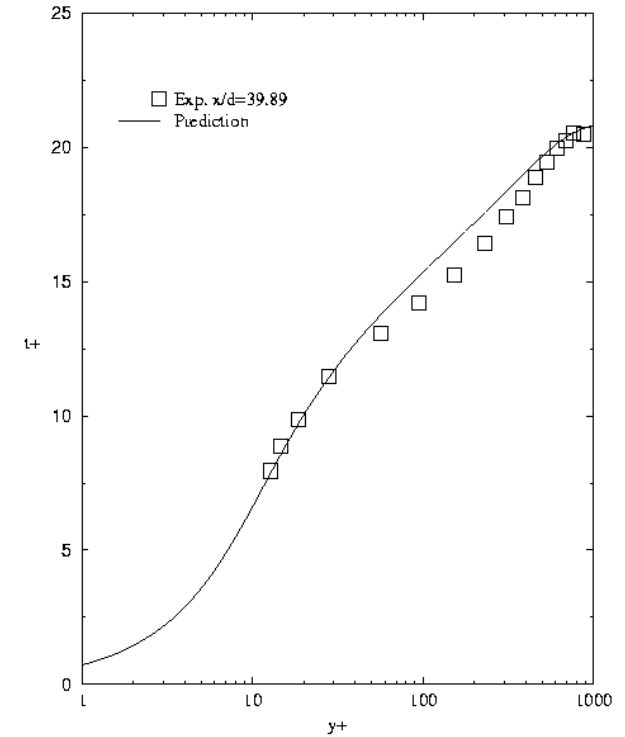
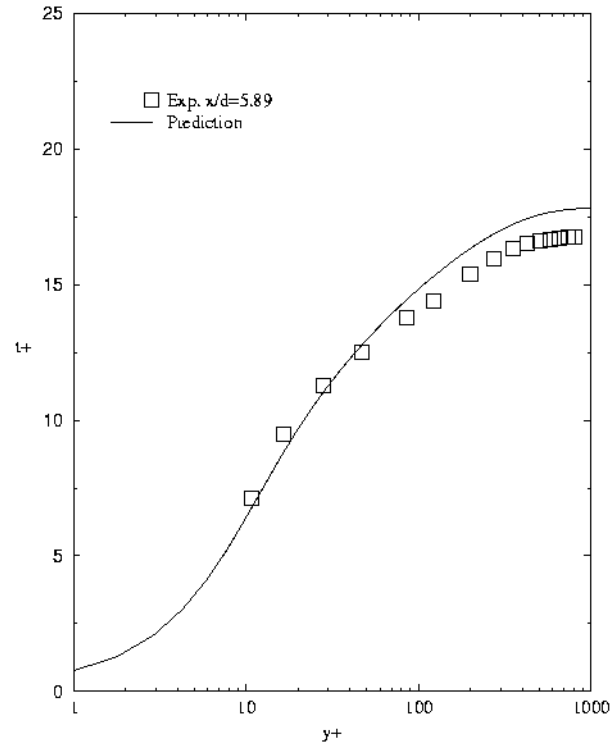
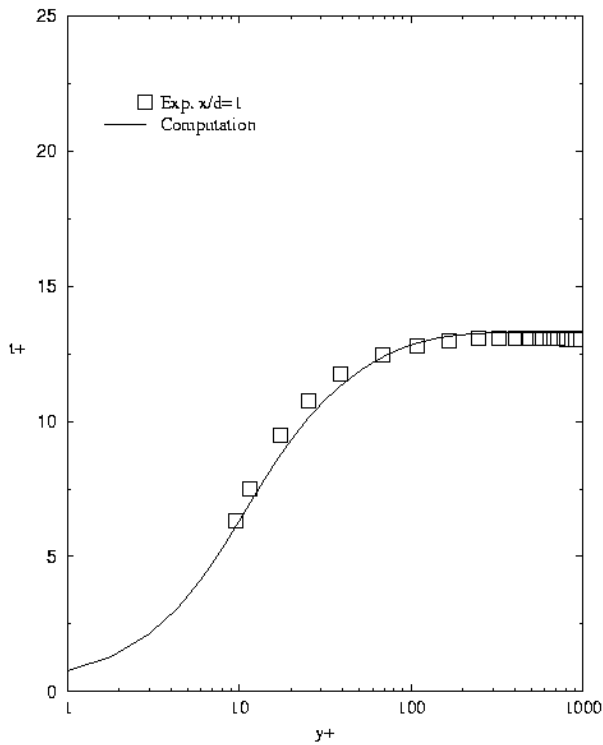
Przykład 3 - rozbieg termiczny w rurze



- Eksperyment - Hishida & Nagano (1979), (1988)
- Model osiowosymetryczny
- Siatka strukturalna (70 x 200) $y^+ < 0.2$
- Metoda SIMPLEC oraz schematy II rzędu
- Przepływ rozwinięty na wlocie $Re = 40000$
- Lepkość molekularna dla powietrza wg formuły Sutherlanda
- Molekularny współczynnik dyfuzji ciepła w funkcji temperatury

KONFERENCJA CFD

Zaawansowane Modele Numerycznej Termomechaniki Płynów - Zastosowania w Przemysle
25 październik 2002 Warszawa

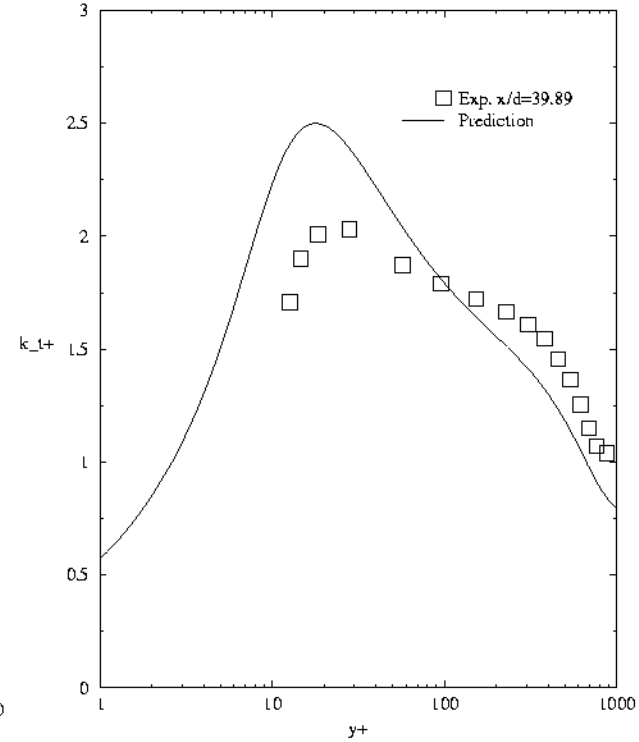
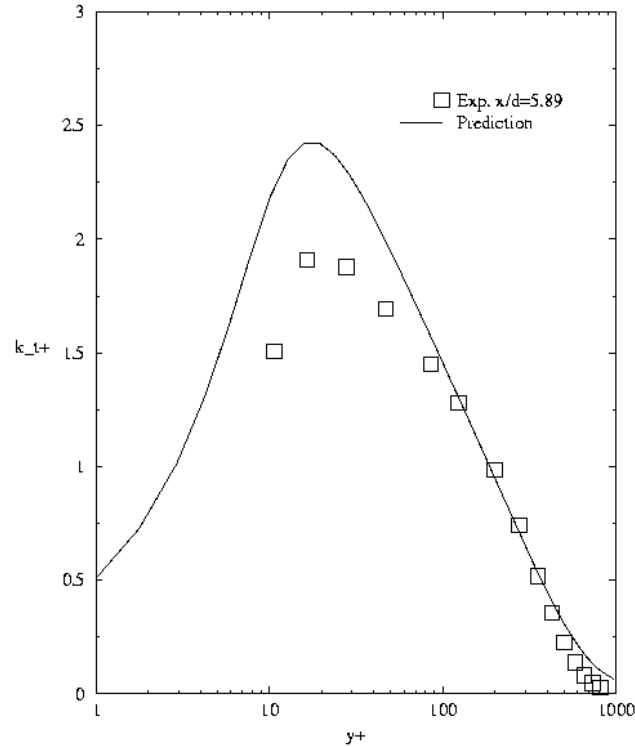
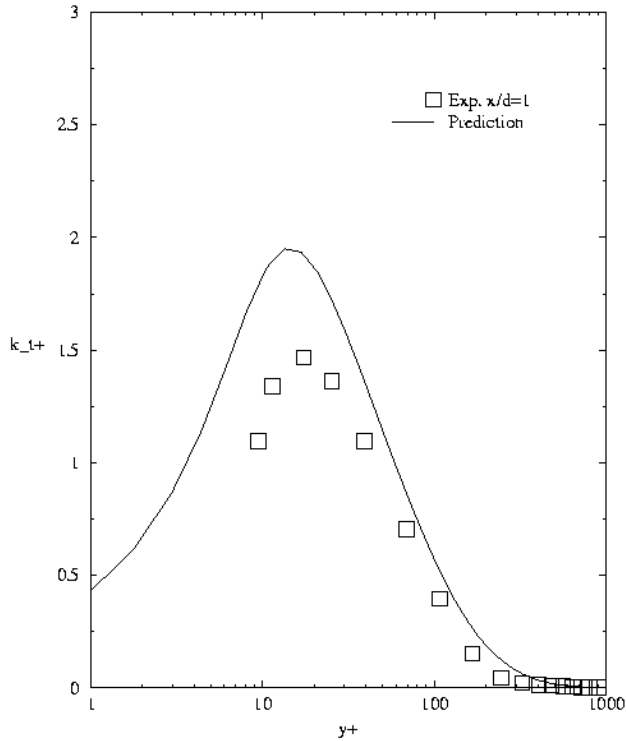


KONFERENCJA CFD

Zaawansowane Modele Numerycznej Termomechaniki Płynów - Zastosowania w Przemysle

25 październik 2002 Warszawa

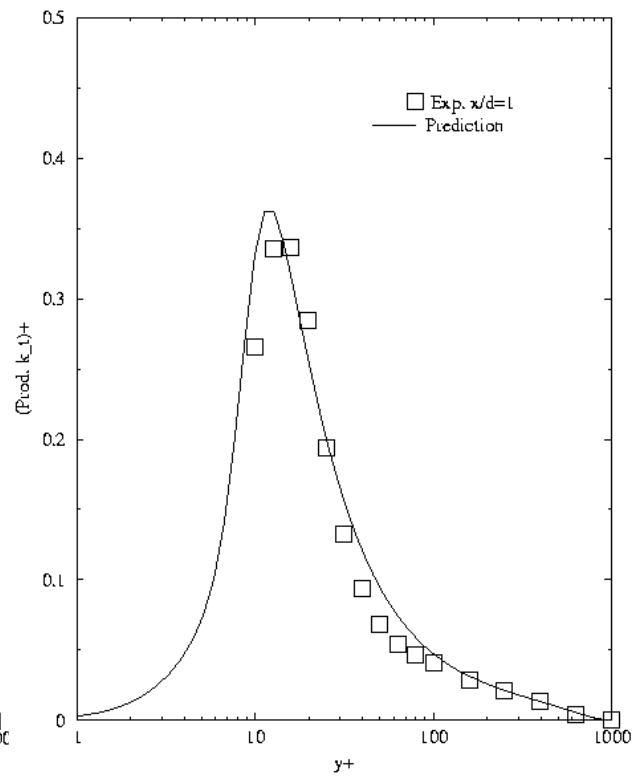
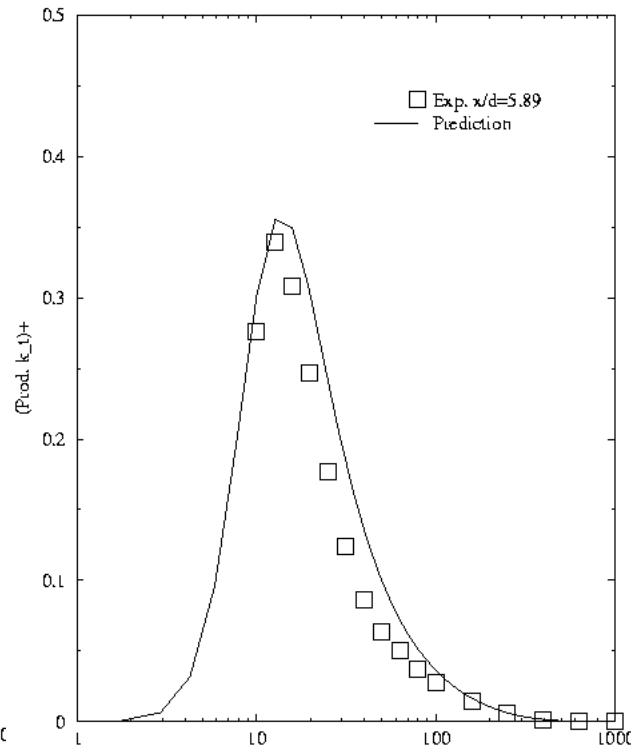
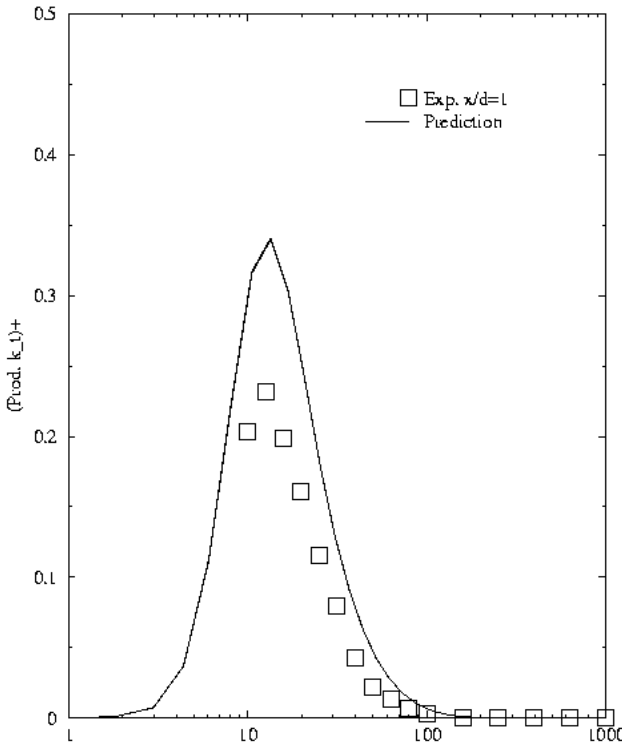
$$\left(\frac{\overline{\theta'^2}}{2} \right)^+$$



KONFERENCJA CFD

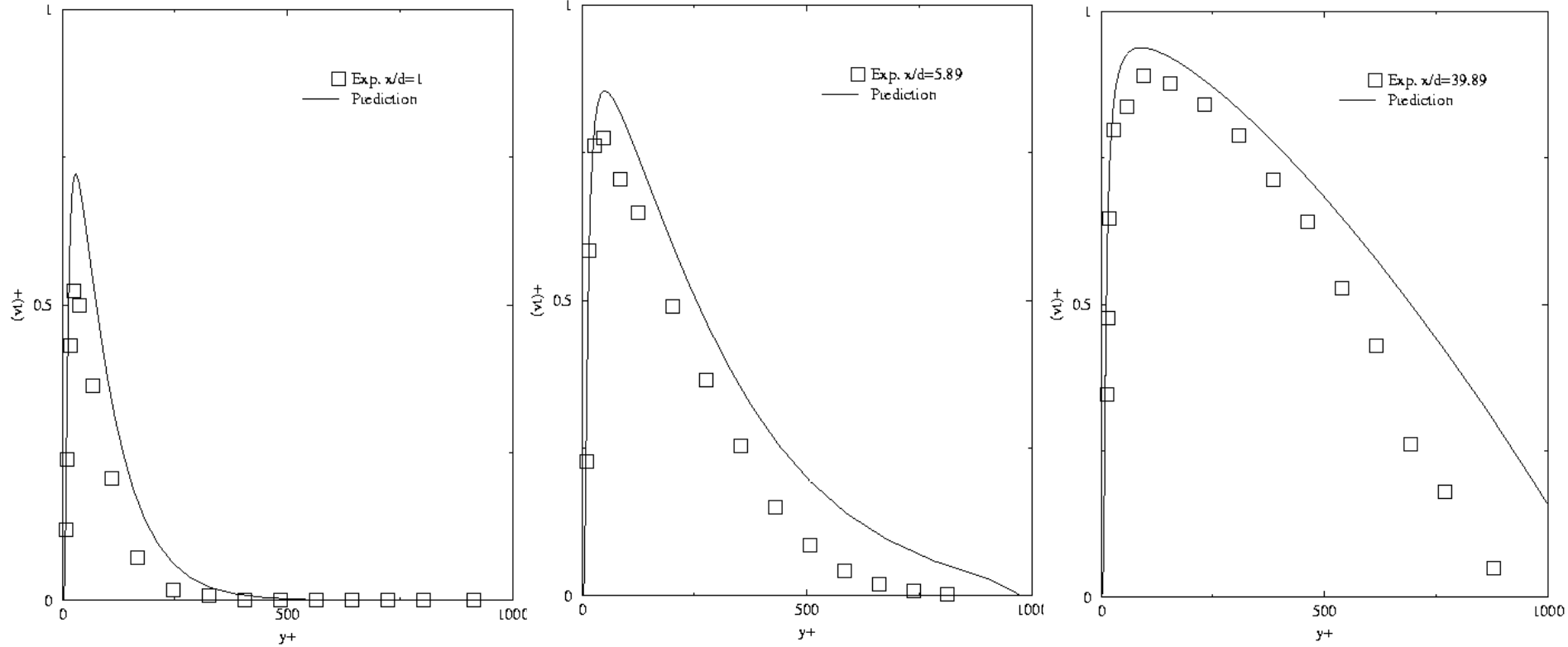
Zaawansowane Modele Numerycznej Termomechaniki Płynów - Zastosowania w Przemysle

25 październik 2002 Warszawa



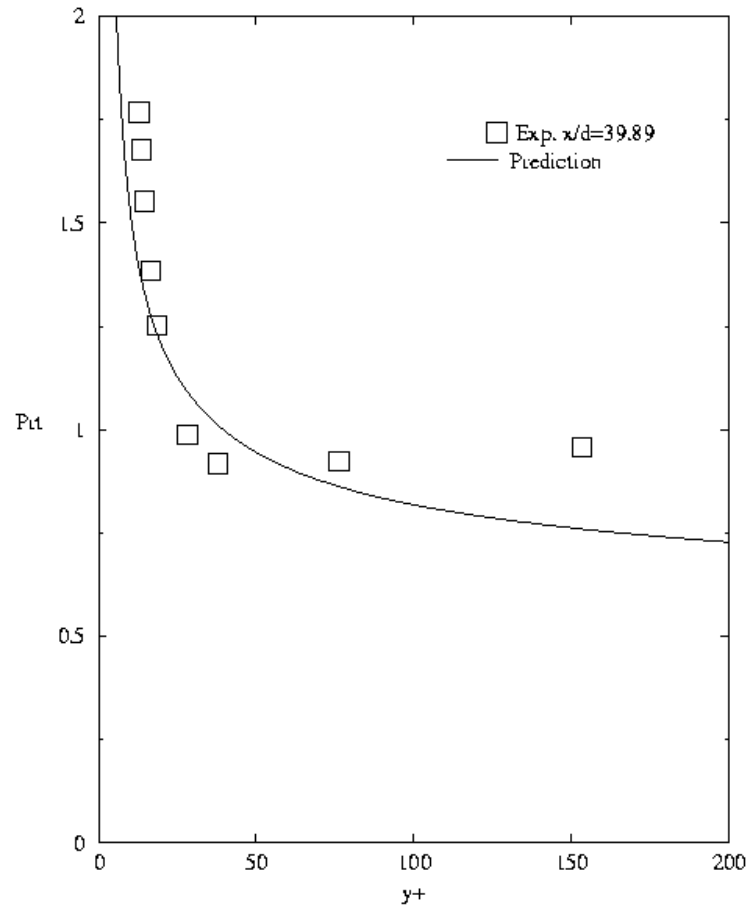
KONFERENCJA CFD

Zaawansowane Modele Numerycznej Termomechaniki Płynów - Zastosowania w Przemysle
25 października 2002 Warszawa



KONFERENCJA CFD

Zaawansowane Modele Numerycznej Termomechaniki Płynów - Zastosowania w Przemysle
25 październik 2002 Warszawa



KONFERENCJA CFD

Zaawansowane Modele Numerycznej Termomechaniki Płynów - Zastosowania w Przemysle
25 października 2002 Warszawa



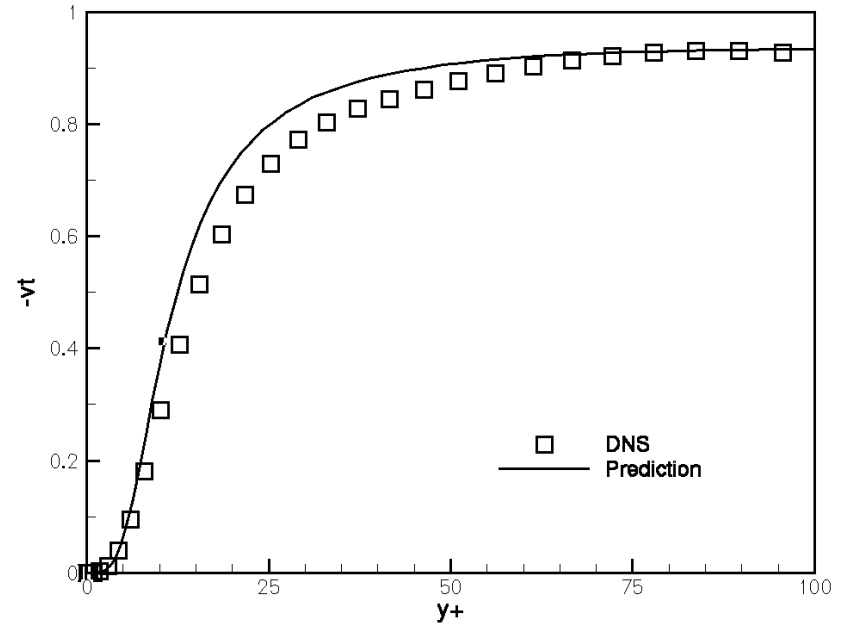
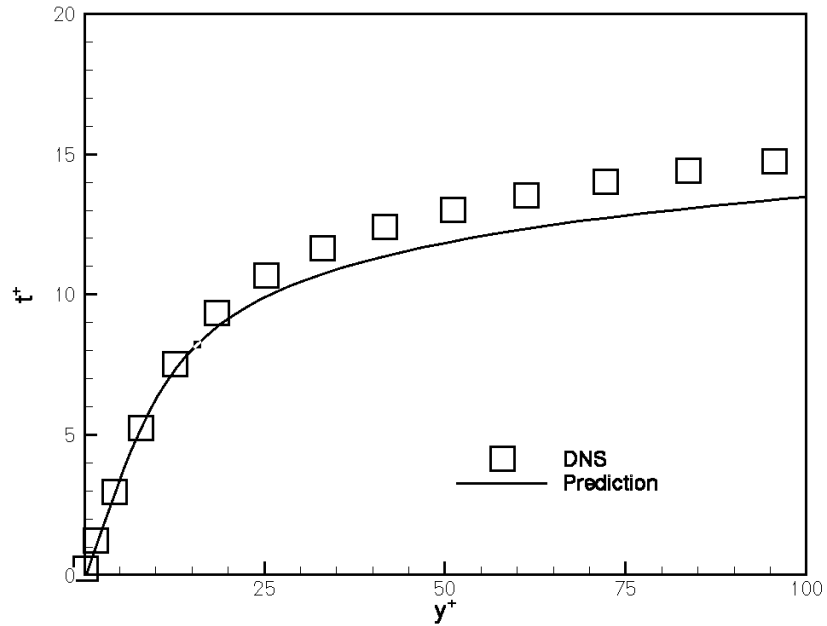
Przykład 4 - przepływ w kanale płaskim

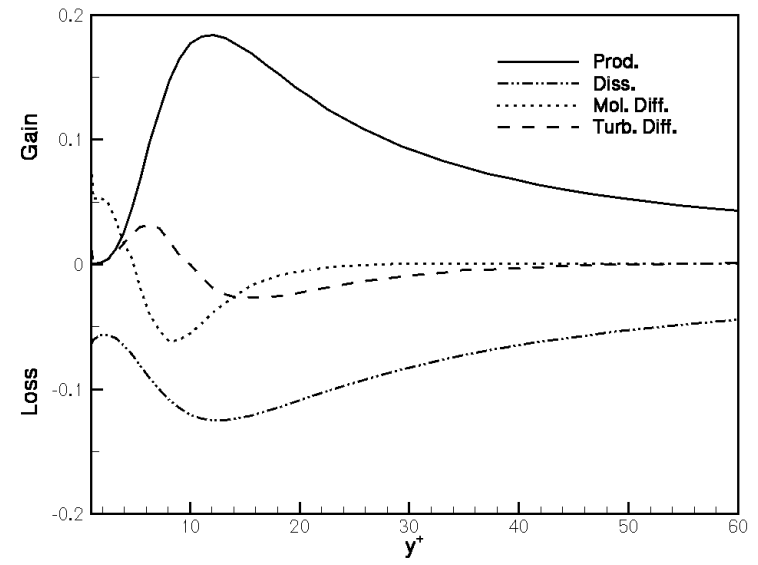
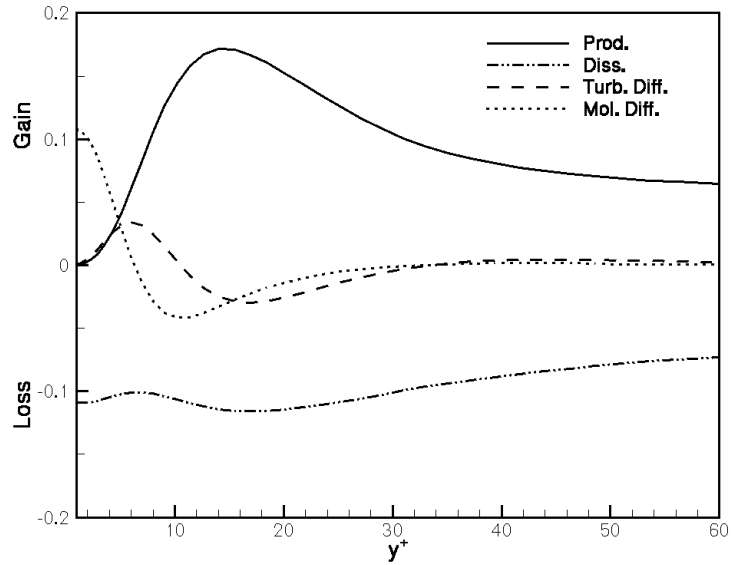
- Obliczenia DNS - Kasagi (1992)
- Model 2D
- Siatka strukturalna (120 x 100) $y^+ < 0.2$
- Metoda SIMPLEC
- Schematy II rzędu
- Przepływ rozwinięty na wlocie $Re = 4560$
- Na ścianie $q = \text{const}$
- Lepkość molekularna dla powietrza wg formuły Sutherlanda
- Molekularny współczynnik dyfuzji ciepła w funkcji temperatury

KONFERENCJA CFD

Zaawansowane Modele Numerycznej Termomechaniki Płynów - Zastosowania w Przemysle

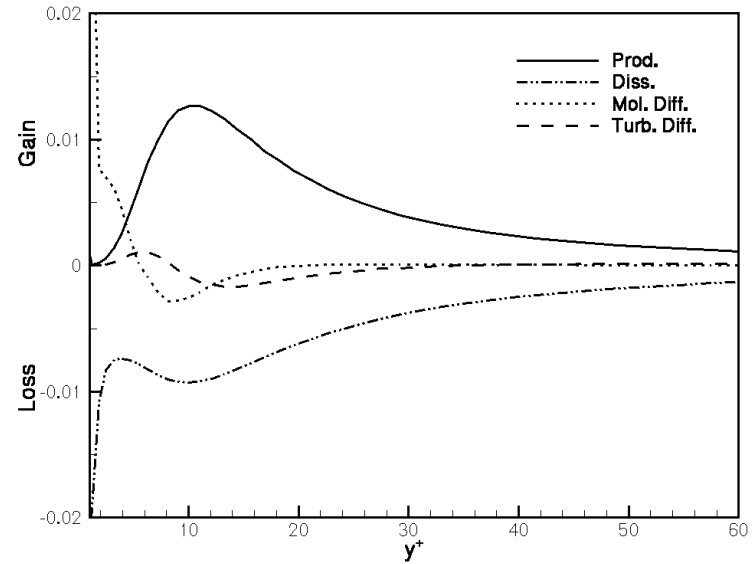
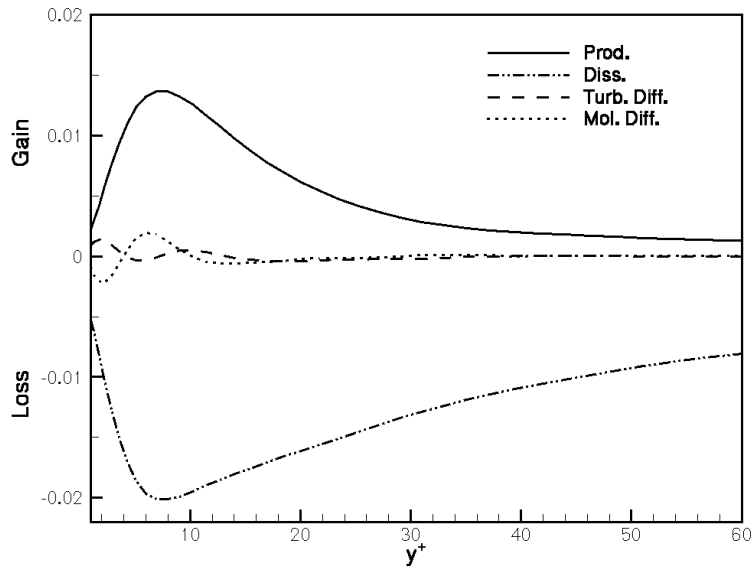
25 październik 2002 Warszawa





KONFERENCJA CFD

Zaawansowane Modele Numerycznej Termomechaniki Płynów - Zastosowania w Przemysle
25 październik 2002 Warszawa



Podsumowanie

- Model **Durbina** daje rezultaty zadowalające w obszarze wzdłużnych gradientów ciśnienia
- Zmodyfikowany model **DWX** bez funkcji tłumiących daje dobre wyniki w obszarze rozbiegu termicznego
- Model wymaga dalszego kalibrowania stałych zarówno w równaniu ewolucji ε_θ jak i w formule na turbulentny współczynnik transportu ciepła α_t



Instytut Maszyn Przepływowych PAN
Ośrodek Termomechaniki Płynów
Zakład Przepływów z Reakcjami Chemicznymi

KONIEC

KONFERENCJA CFD

Zaawansowane Modele Numerycznej Termomechaniki Płynów - Zastosowania w Przemysle
25 październik 2002 Warszawa