

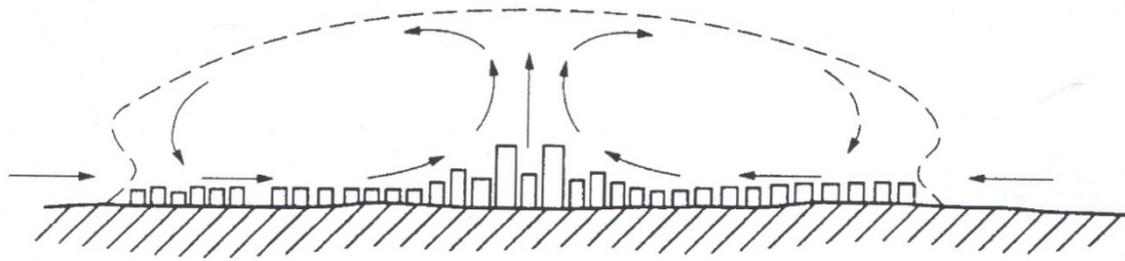
# **РАЗВИТИЕ ТУРБУЛЕНТНОГО ТЕПЛОВОГО ФАКЕЛА НАД ГОРОДСКИМ ОСТРОВОМ ТЕПЛА В УСТОЙЧИВО СТРАТИФИЦИРОВАННОЙ АТМОСФЕРЕ**

**Курбацкий А. Ф.**

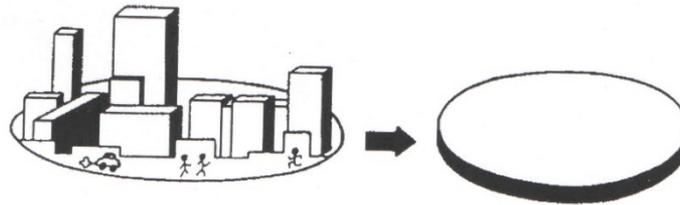
**Институт теоретической и прикладной механики  
им. С.А. Христиановича СО РАН**

**Курбацкая Л. И.**

**Институт вычислительной математики и  
математической геофизики СО РАН**



Модель городского острова тепла при слабом ветре

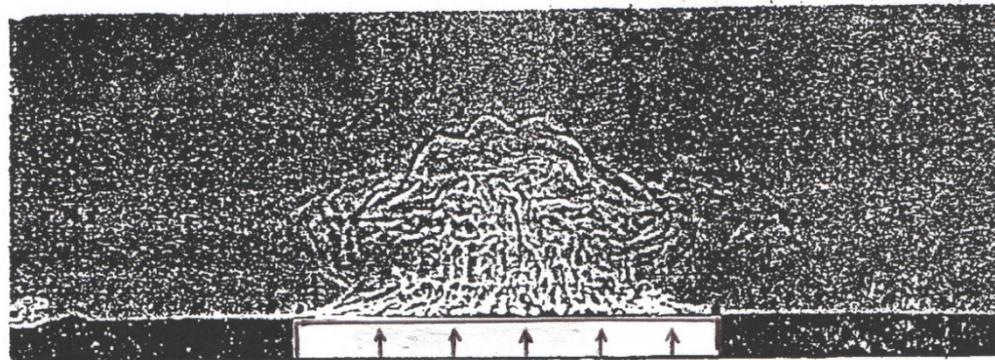


(a)

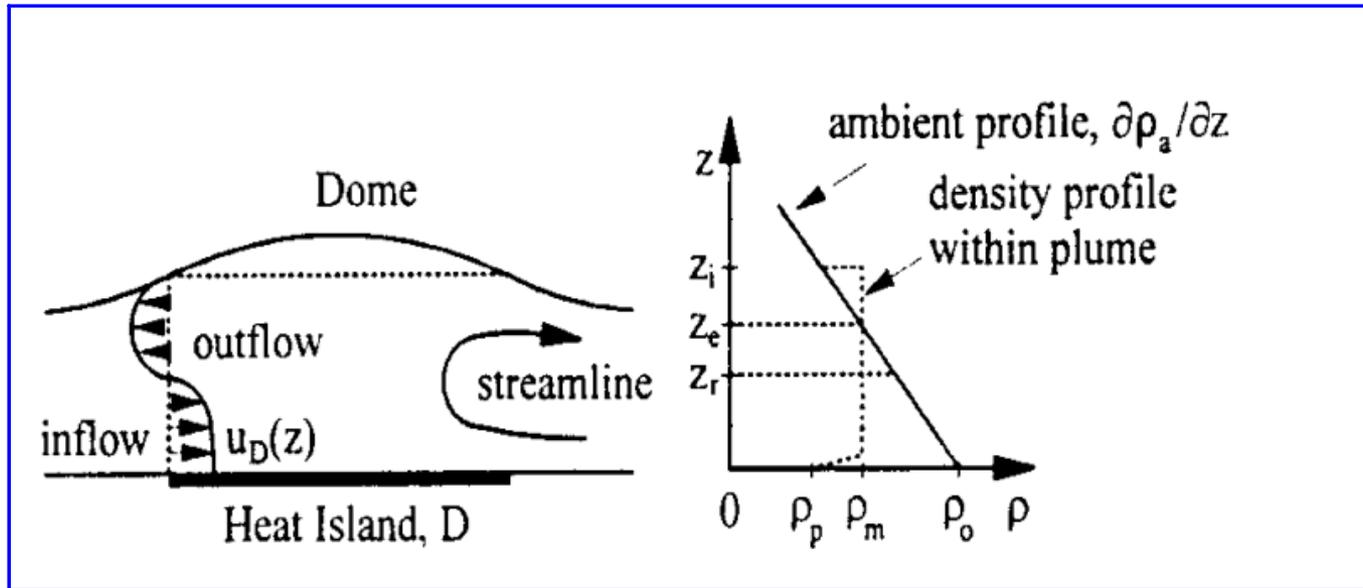
(b)

(a) Реальный источник  
тепла и примесей

(b) Лабораторная модель  
для прототипа (a)



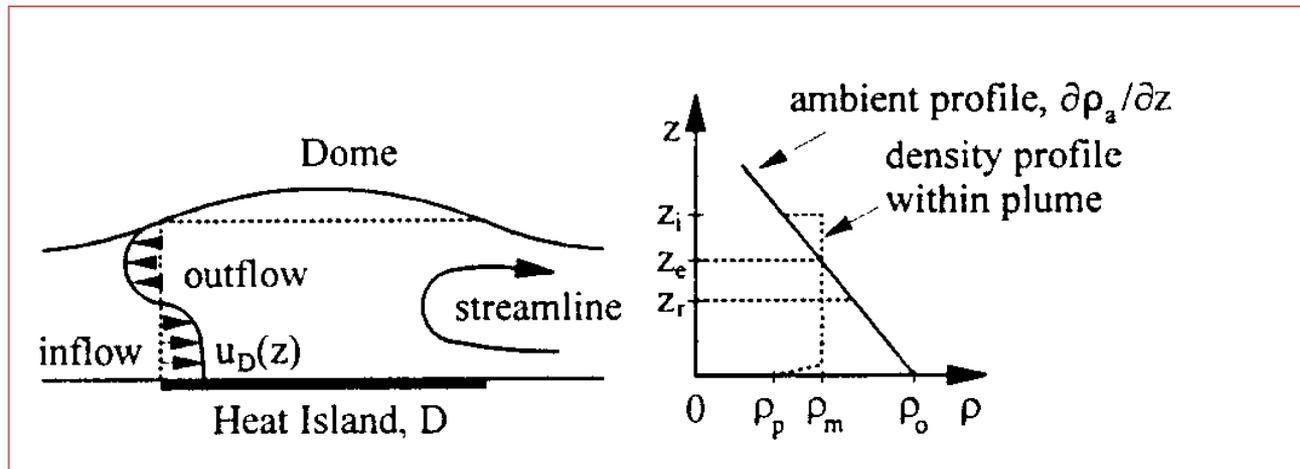
# Схема циркуляции над островом тепла



- Тепловой факел малого относительного удлинения:  
 $z_i / D \ll 1$
- $z_i$ - высота перемешанного слоя, определена высотой, на которой  $|(T_m - T_a)|$  максимальна.

Движение воздуха рассматривается, как обладающее осевой симметрией

# Физическая постановка задачи о циркуляции над островом тепла



- Проникающая турбулентная конвекция индуцируется постоянным потоком тепла  $H$  от поверхностного источника тепла (нагреваемой пластины диаметра  $D$ ).
- Окружающий воздух устойчиво стратифицирован и первоначально находится в покое.

# Модель турбулентных потоков тепла

Для случая больших турбулентных чисел Рейнольдса замкнутое уравнение для вектора турбулентного потока

$$\frac{D\overline{u_i\theta}}{Dt} - \frac{\partial}{\partial x_k} \left\{ c_{s\theta} \frac{E}{\varepsilon} \left( \overline{u_i u_\alpha} \frac{\partial \overline{u_k \theta}}{\partial x_\alpha} + \overline{u_k u_\alpha} \frac{\partial \overline{u_i \theta}}{\partial x_\alpha} \right) \right\} = -\overline{u_i u_j} \frac{\partial T}{\partial x_j}$$

$$-\overline{u_j \theta} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - c_{1\theta} \frac{\overline{u_i \theta}}{\sqrt{\tau\tau_\theta}} + c_{2\theta} \overline{u_j \theta} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + c_{3\theta} g_i \beta \overline{\theta^2} - g_i \beta \overline{\theta^2}$$

упрощается в приближении слабо равновесной турбулентности. Горизонтальный и вертикальный потоки имеют вид

$$-\overline{u\theta} = c_T \frac{E^2}{\varepsilon} \sqrt{2R} \frac{\partial T}{\partial r},$$

$$-\overline{w\theta} = c_T \frac{E^2}{\varepsilon} Fr^{-2} \sqrt{2R} \frac{\partial T}{\partial z} - \frac{1 - c_{2\theta}}{c_{1\theta}} \frac{E}{\varepsilon} \sqrt{2R} \cdot Fr^{-2} \overline{\theta^2}.$$

# Модели турбулентных потоков импульса

Для нормальных турбулентных напряжений используется градиентная модель Буссинеска, сохраняющая некоторую анизотропию нормальных напряжений:

$$\overline{u^2} = \frac{2}{3}E - 2K_m \frac{\partial U}{\partial r}, \quad \overline{w^2} = \frac{2}{3}E - 2K_m \frac{\partial W}{\partial z}, \quad \overline{v^2} = \frac{2}{3}E - 2K_m \frac{U}{r}.$$

Для касательного турбулентного напряжения модель Буссинеска имеет вид:

$$-\overline{uw} = K_m \left( \frac{\partial U}{\partial z} + \frac{\partial W}{\partial r} \right).$$

# Параметры моделей турбулентных потоков

$$\frac{\partial E}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (rUE) + \frac{\partial}{\partial z} (WE) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left\{ r \left[ Re^{-1} + \frac{K_m}{\sigma_E} \right] \frac{\partial E}{\partial r} \right\} +$$

$$+ \frac{\partial}{\partial z} \left\{ r \left[ Re^{-1} + \frac{K_m}{\sigma_E} \right] \frac{\partial E}{\partial z} \right\} + P - \varepsilon + G,$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (rU\varepsilon) + \frac{\partial}{\partial z} (W\varepsilon) - \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left\{ r \left[ Re^{-1} + \frac{K_m}{\sigma_\varepsilon} \right] \frac{\partial \varepsilon}{\partial r} \right\}$$

$$- \frac{\partial}{\partial z} \left\{ r \left[ Re^{-1} + \frac{K_m}{\sigma_E} \right] \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} \right\} = -\frac{\varepsilon}{\tau} \Psi,$$

$$\frac{\partial \overline{\theta^2}}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (rU\overline{\theta^2}) + \frac{\partial}{\partial z} (W\overline{\theta^2}) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left\{ r \left[ c_{\theta 2} \frac{E}{\varepsilon} \overline{\theta^2} \right] \frac{\partial \overline{\theta^2}}{\partial r} \right\} +$$

$$+ \frac{\partial}{\partial z} \left\{ r \left[ c_{\theta 2} \frac{E}{\varepsilon} \overline{\theta^2} \right] \frac{\partial \overline{\theta^2}}{\partial z} \right\} - 2\overline{u\theta} \frac{\partial T}{\partial r} - 2\overline{w\theta} \frac{\partial T}{\partial z} - \frac{1}{R} \frac{\varepsilon}{E} \overline{\theta^2}.$$

$$(R = \tau_\theta / \tau = (1/2) \overline{\theta^2} / \varepsilon_\theta / (E/\varepsilon) = 0,6)$$

## Граничные условия

- В согласии с результатами лабораторного эксперимента, численно моделируется крупномасштабная проникающая конвекция над островом тепла без разрешения поверхностного слоя городской шероховатости.
- Поэтому граничные условия формулируются на первом расчетном слое вычислительной сетки с учетом условий термической устойчивости среды (неустойчивые условия над островом тепла (нагревателе), устойчивые условия-вне нагревателя).
- Используется теория локального подобия приземного слоя Монина-Обухова по безытерационной процедуре нахождения поверхностных потоков: скорости трения  $u_*$ , масштаба температурного поля  $\theta_*$  и масштаба Монина-Обухова

$$L = u_*^2 / (k\beta g\theta_*).$$

- ★ Граничное условие для горизонтальной скорости формулируется в конечно-разностном виде на двух нижних узлах сетки

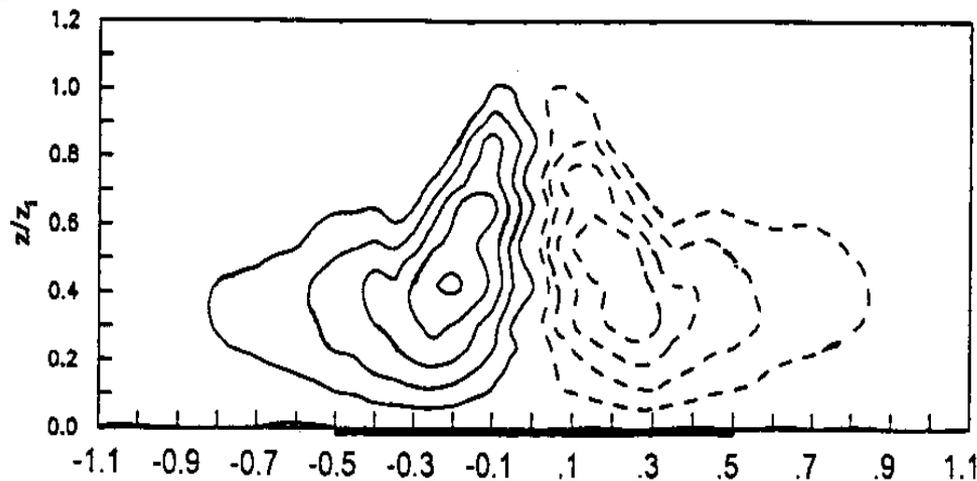
$$U_1 / U_2 = [\text{Ln}(z_1/z_0) - \Psi(z_1)] / [\text{Ln}(z_2/z_0) - \Psi(z_2)].$$

- ★ Граничное условие для температуры определяется: на нагревателе заданным потоком тепла  $H_0$ , вне нагревателя - температурой поверхности  $T_0$ .

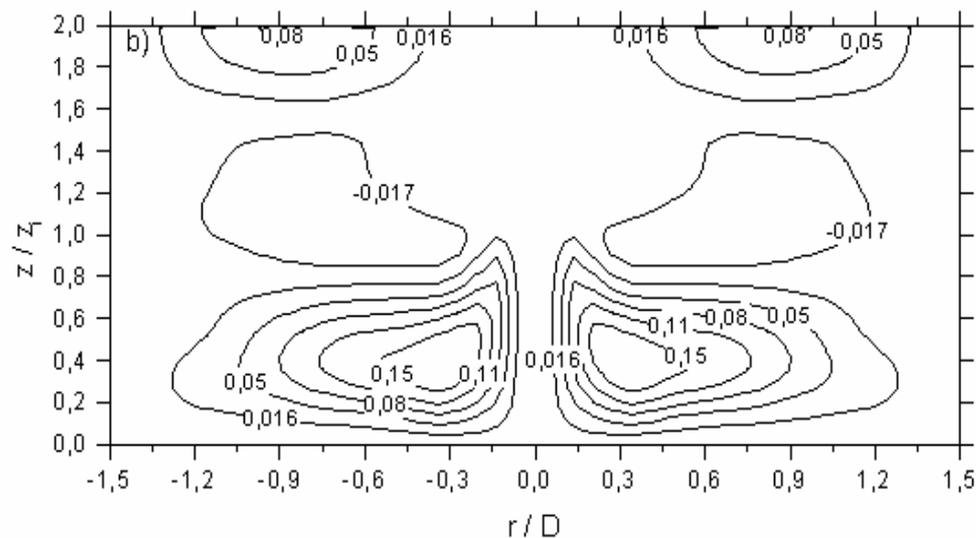
## Численная реализация

Использован метод конечных разностей с полуневной схемой переменных направлений (“вторая схема Роуча с разностями против потока”) на разностной сетке со смещенными узлами. Вычисления проведены на сетке с 25 узлами по радиальной координате, а по вертикали сетка имела 120 узлов. Число узлов сетки в радиальном направлении могло варьироваться путем изменения линейного размера области интегрирования. Шаг по времени был выбран из условия сохранения точности численного решения.

# Картини линий тока над островом тепла



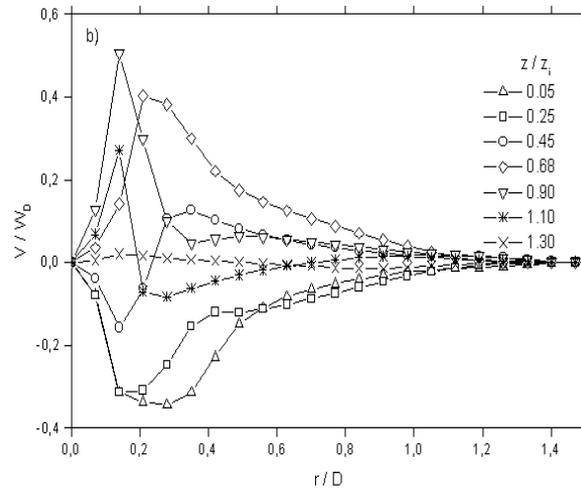
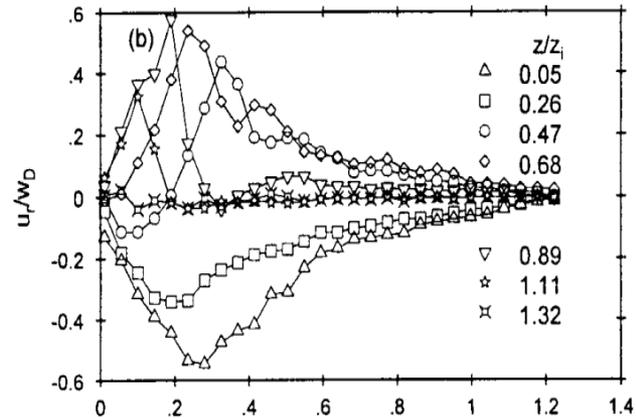
← эксперимент  
Lu et al. ( $H = 0.65$  Вт/см,  
 $Fr = 0.077$ ,  $Re = 8280$ ,  
 $(\partial T / \partial z)_a = 0.5$ , /см)  
(JAM.1997.V.36)



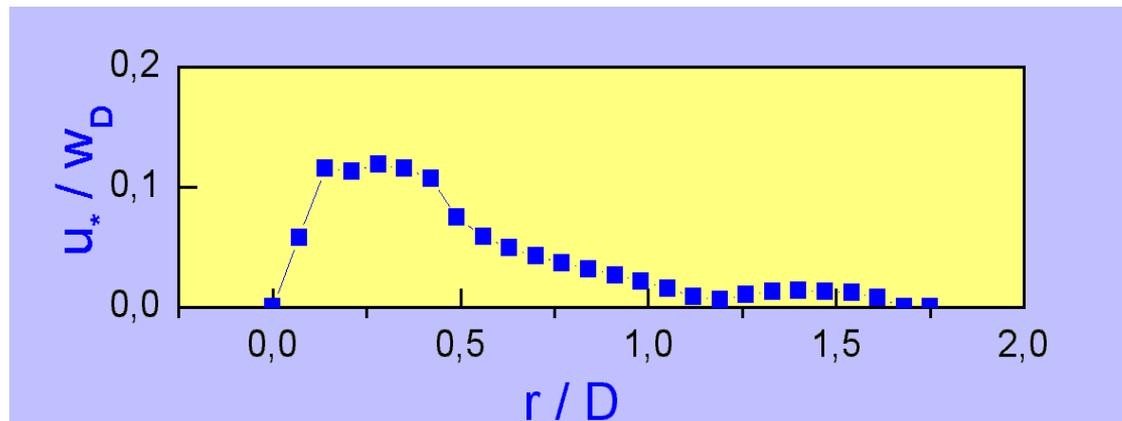
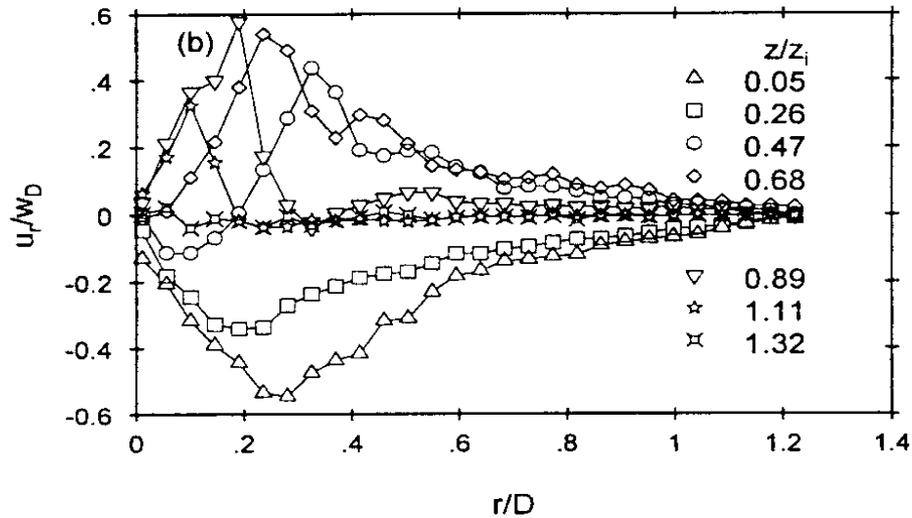
← численное  
моделирование  
при тех же  
параметрах  
эксперимента.

# Радиальная(горизонтальная) скорость на различных высотах

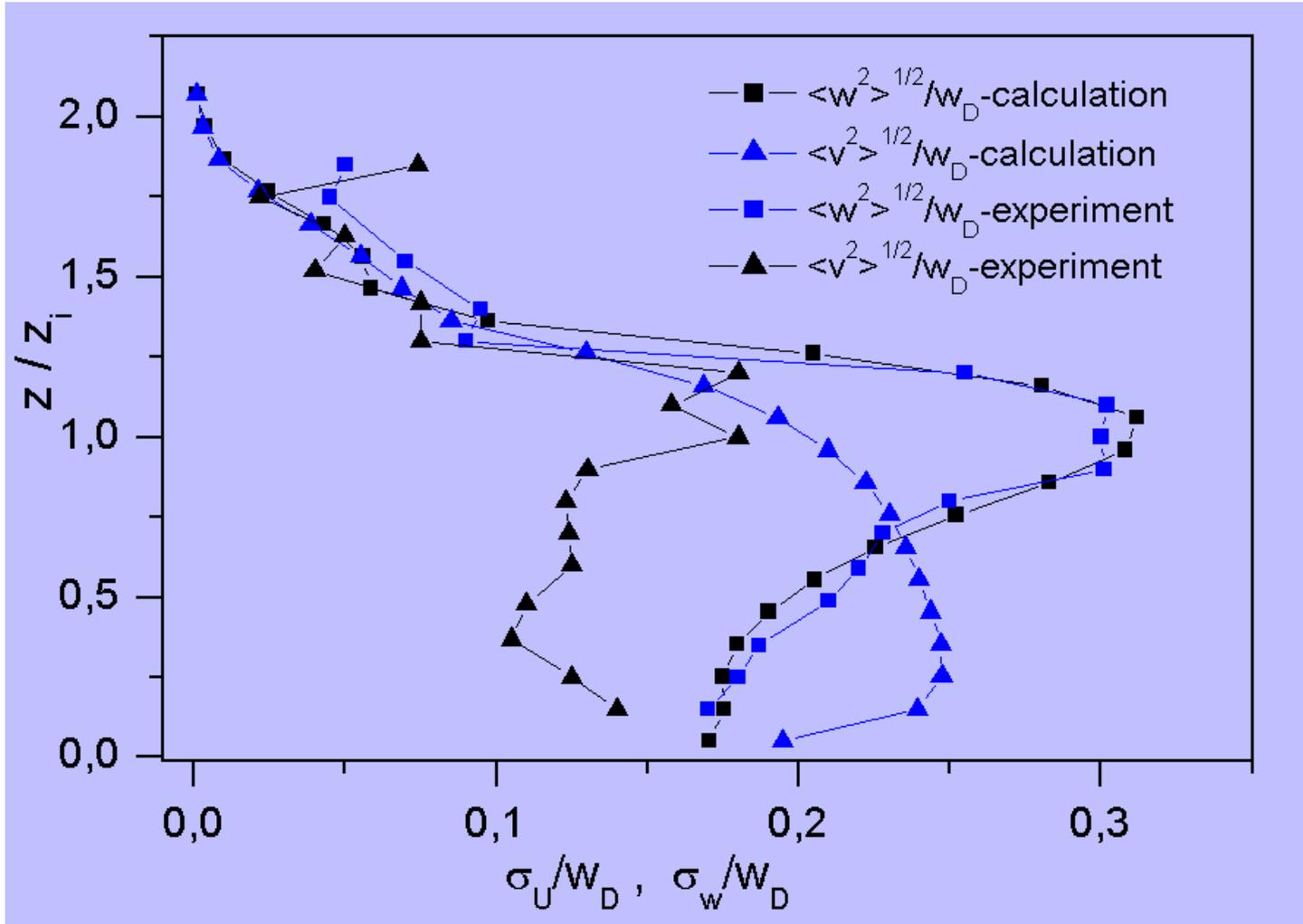
Эксперимент Lu et al. 1997 ( $Fr = 0.077$ ,  $Re = 8280$ )



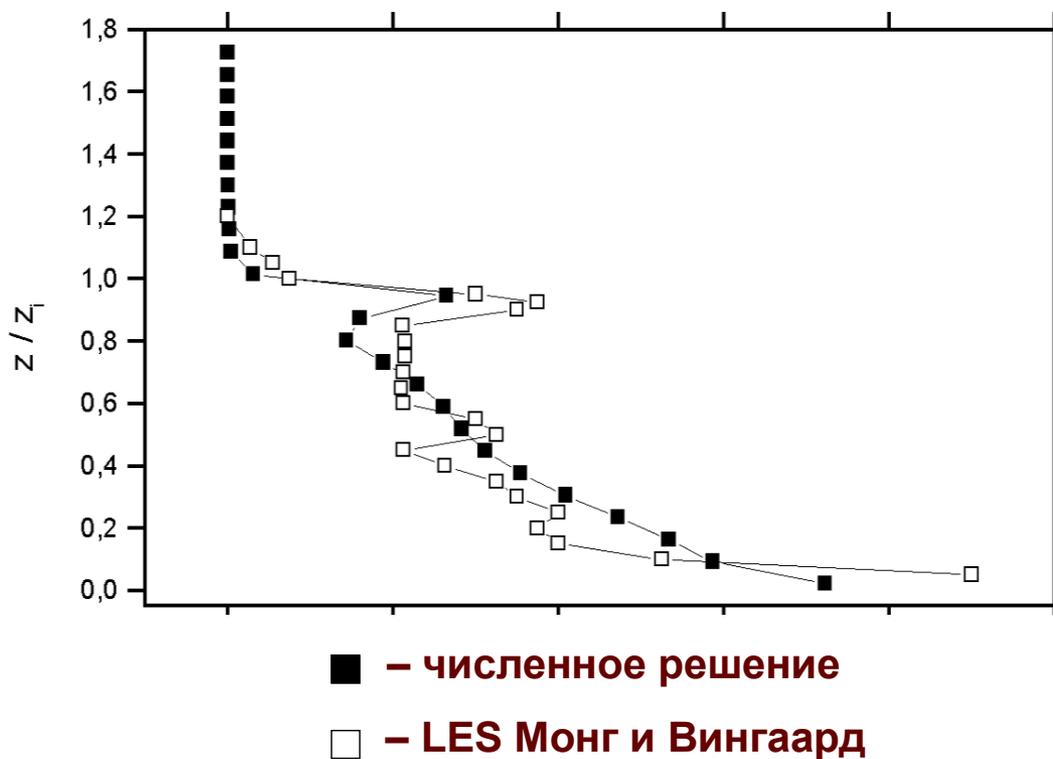
# Радиальная (горизонтальная) скорость и турбулентная скорость трения на поверхности Эксперимент Lu et al. 1997 ( $Fr=0.077$ , $Re=8280$ )



# Интенсивности турбулентности в факеле над островом тепла



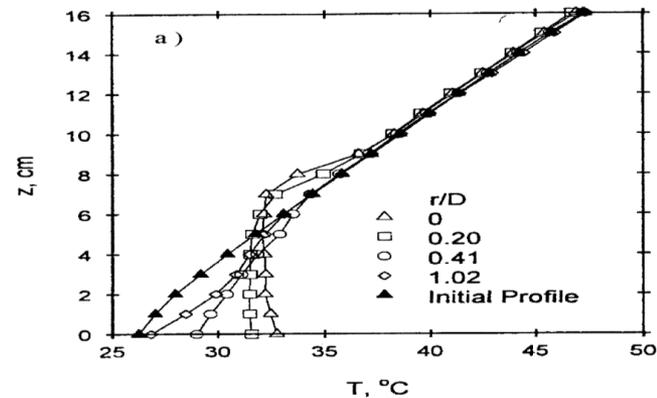
**Диссипация энергии турбулентности  $\varepsilon$**   
нормированная на  $w_D^3 / z_i$  как функция  $z / z_i$  при  $r / D =$   
0.025.



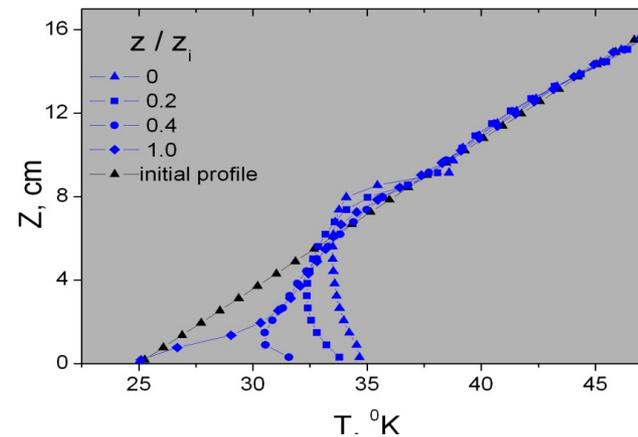
# Вертикальные профили температуры в центре острова тепла

Экспериментальные данные. Lu et al. 1997

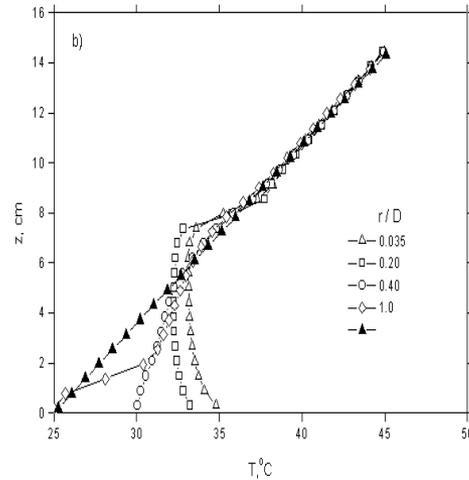
$$Re = 4500, Fr = 0.088$$



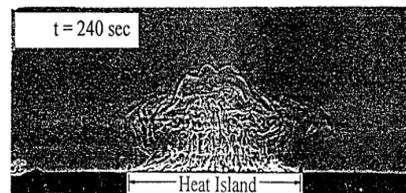
Вычисленные профили



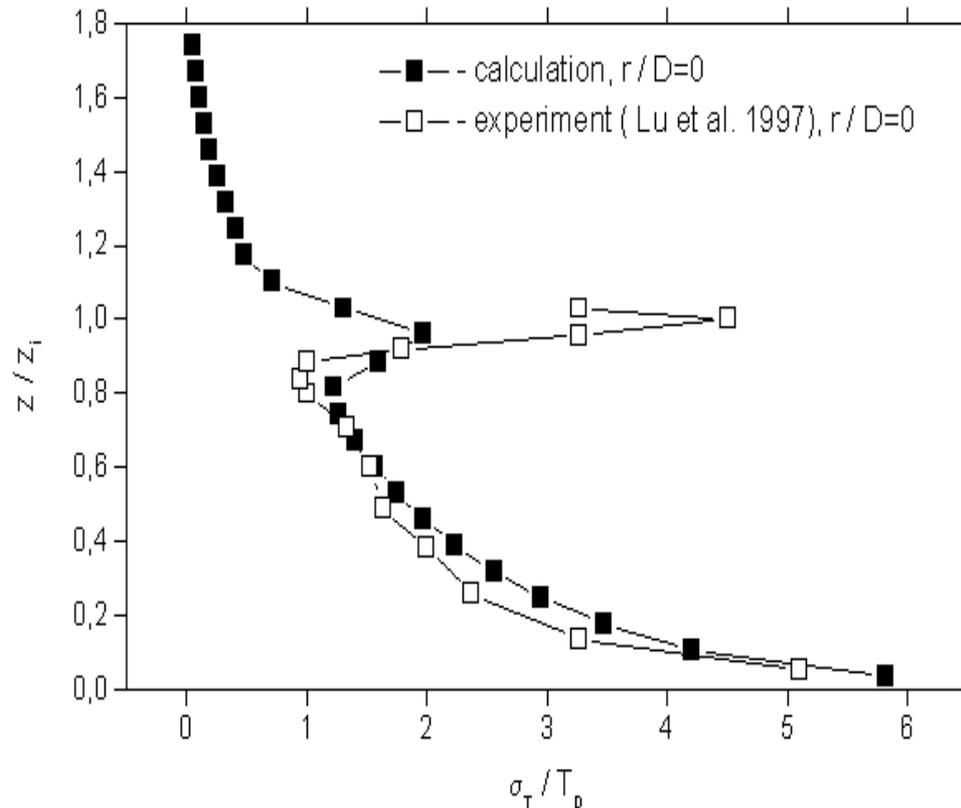
# Форма теплового факела



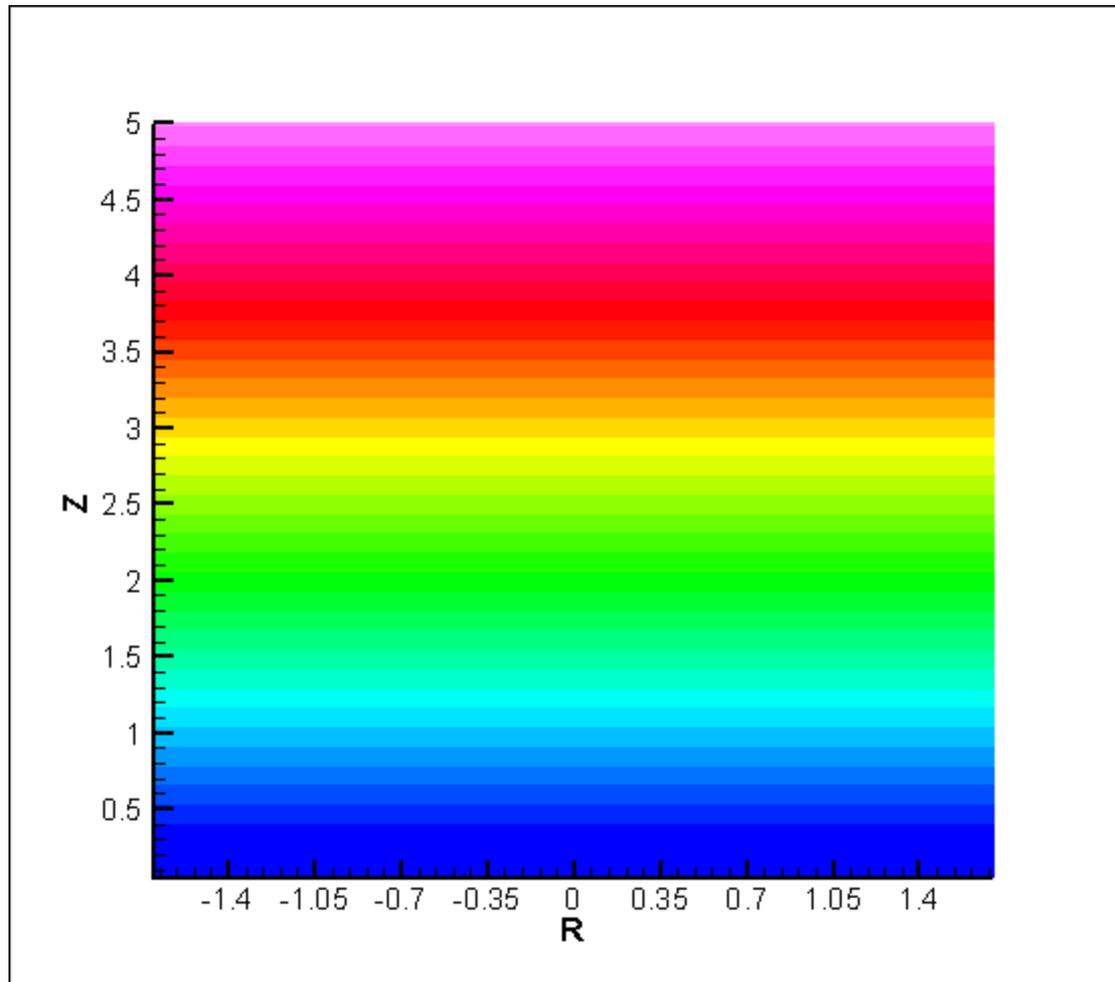
1. Вычисленный профиль температуры внутри плама (факела) имеет характерное “вздутие” (swelling): температура внутри плама ниже, чем температура снаружи на той же самой высоте. Создается область отрицательной плавучести, вследствие возвышения плама в центре
2. Такое поведение показывает, что плум имеет возвышающуюся верхнюю часть в форме “шляпы”



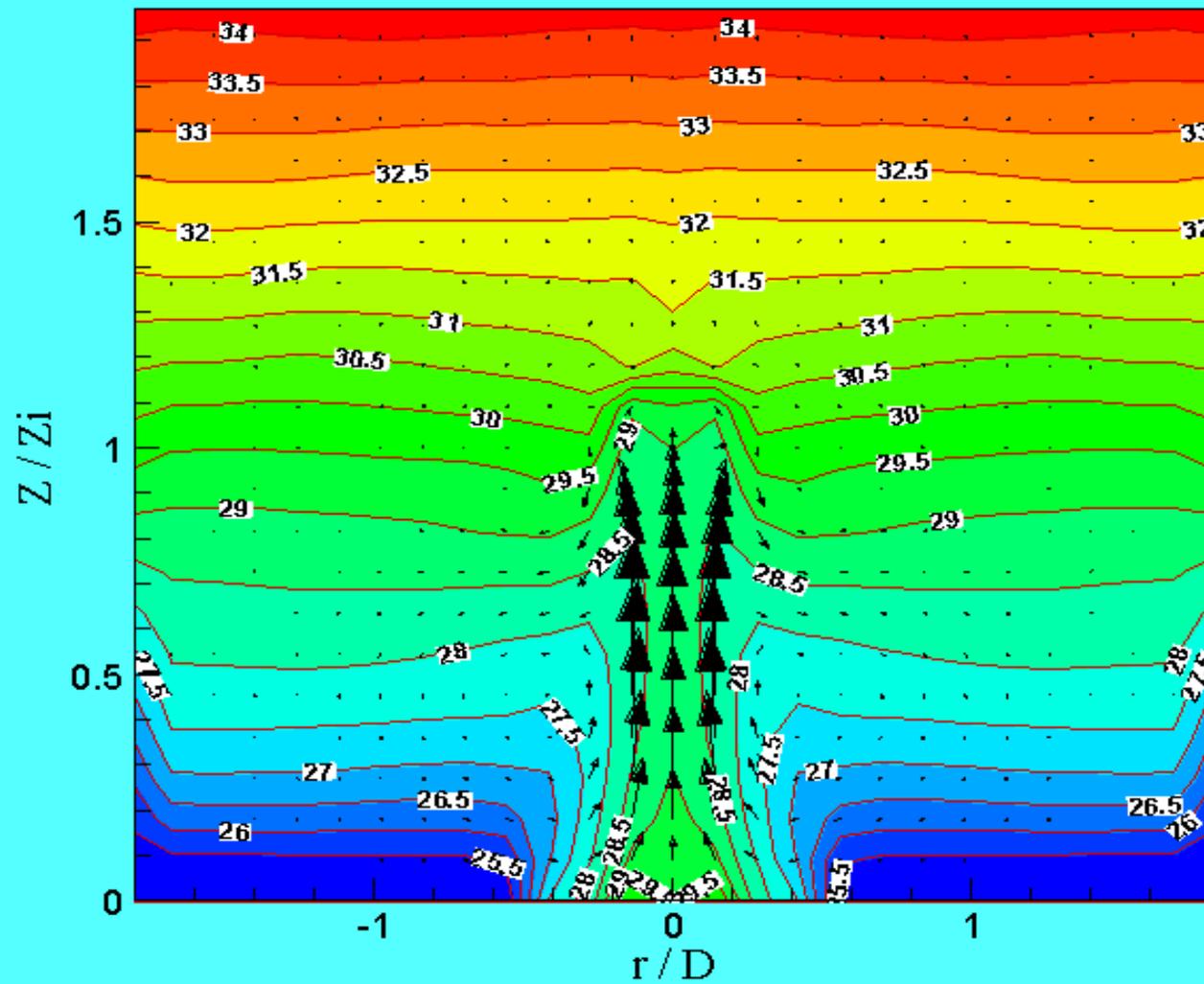
# Вертикальный профиль дисперсии температуры



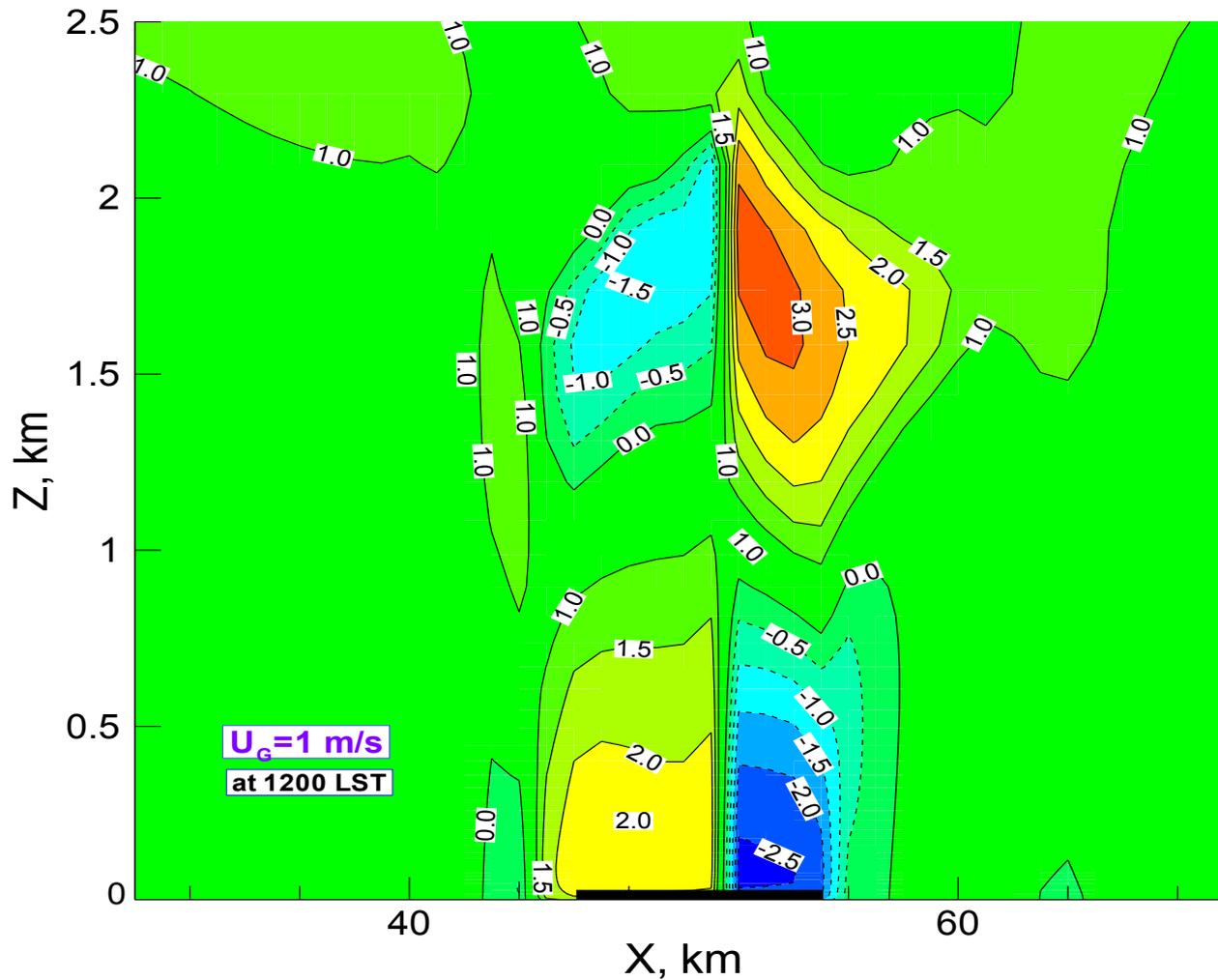
Измеренный ( $\square$ ) и вычисленный ( $\blacksquare$ ) профили  
среднеквадратичных флуктуаций температуры в центре  
острова тепла ( $r / D = 0$ )  
(  $Re = 4500$  ,  $Fr = 0.088$  ).



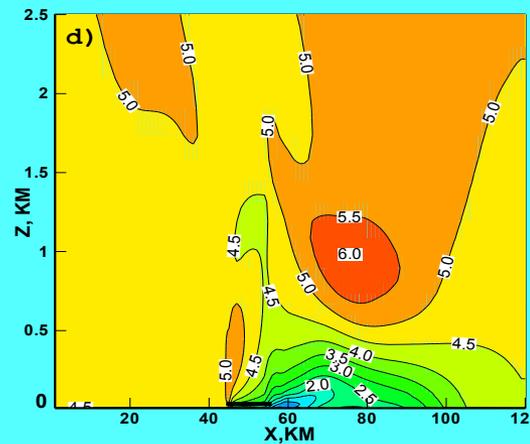
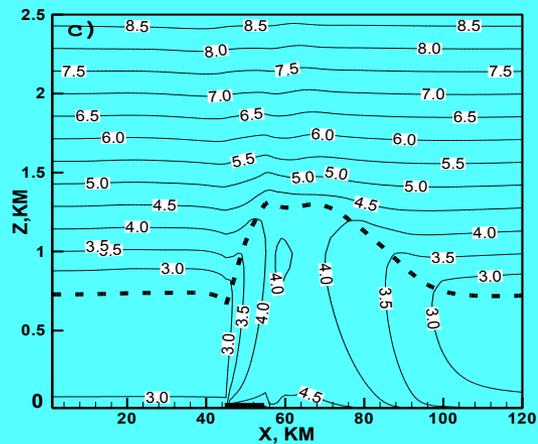
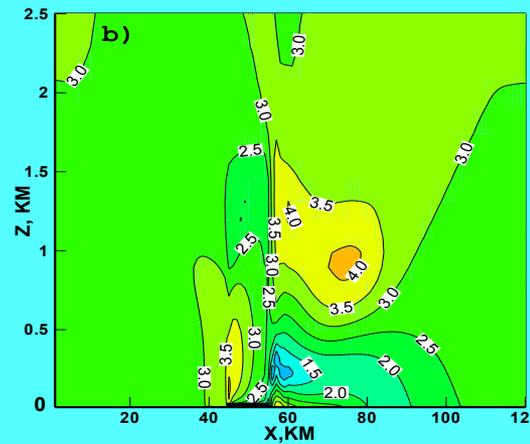
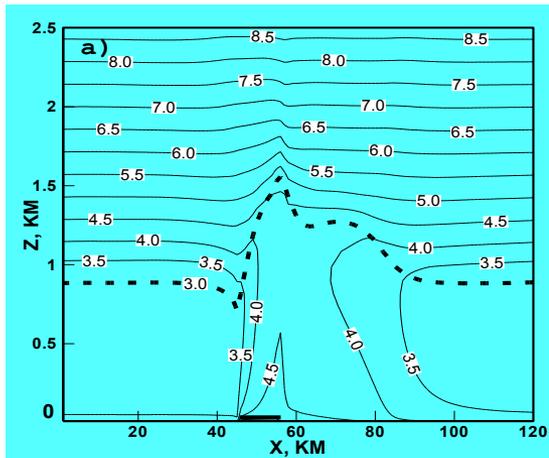
# Temperature isotherms and vector field of velocities



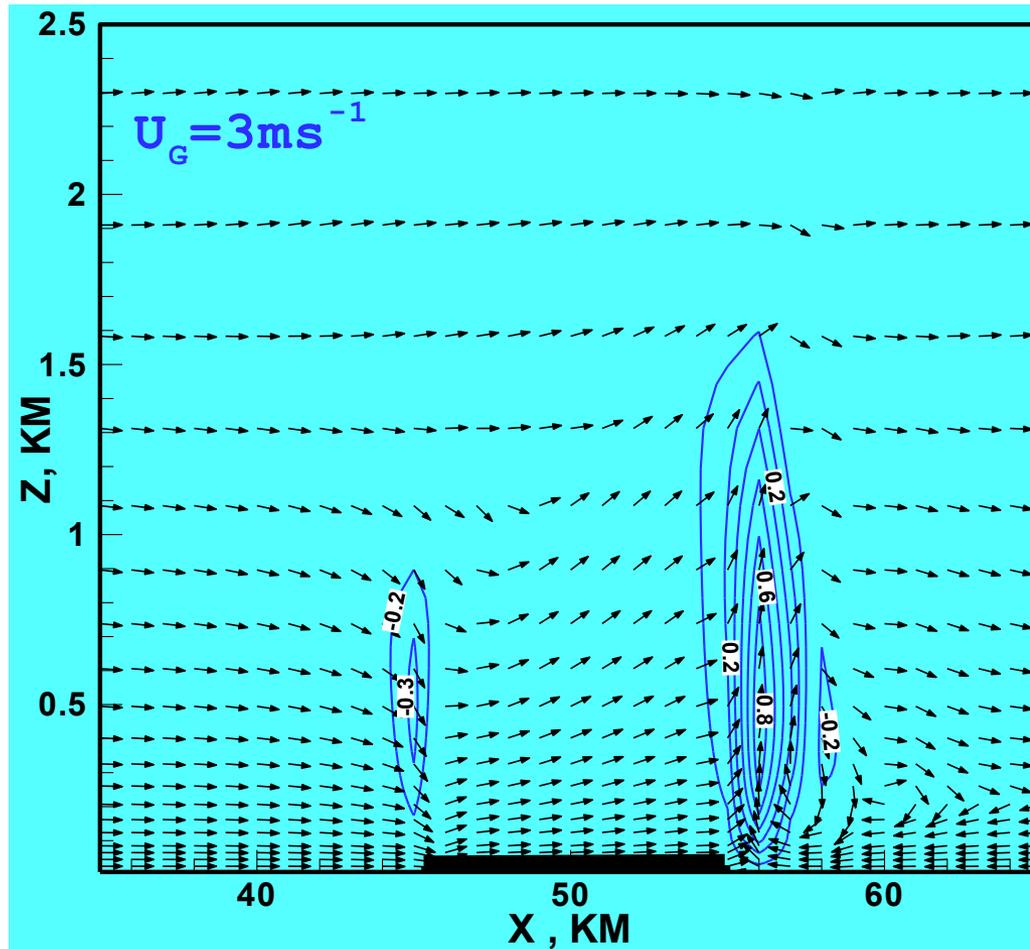
# Вертикальные разрезы скорости ветра ( $U_G=1\text{ms}^{-1}$ )



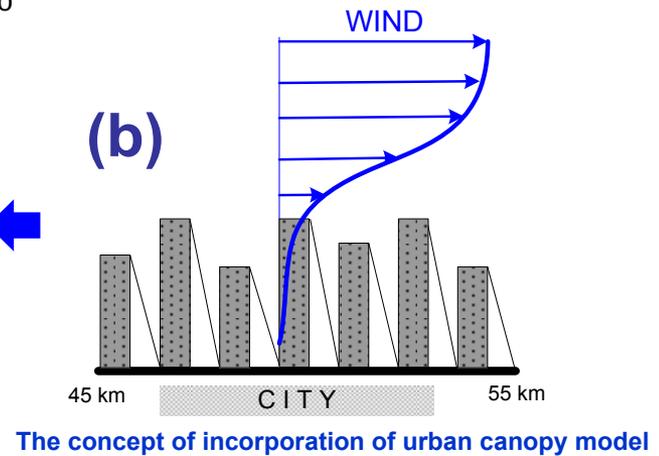
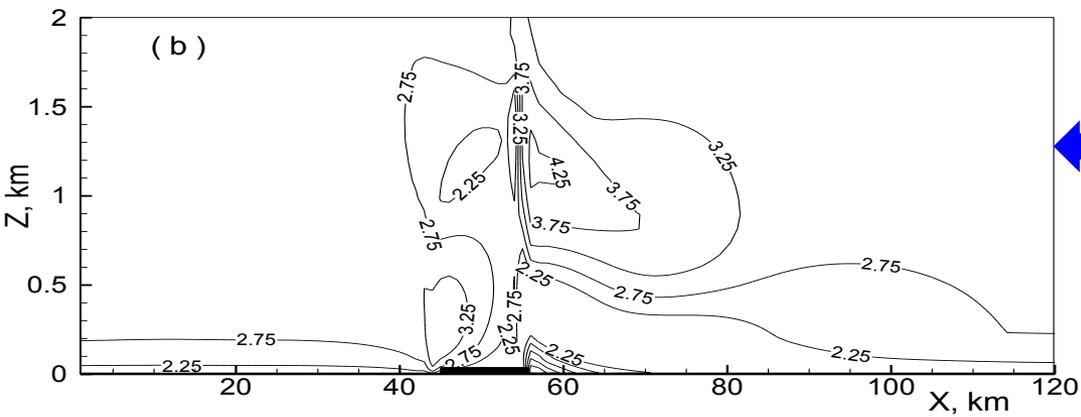
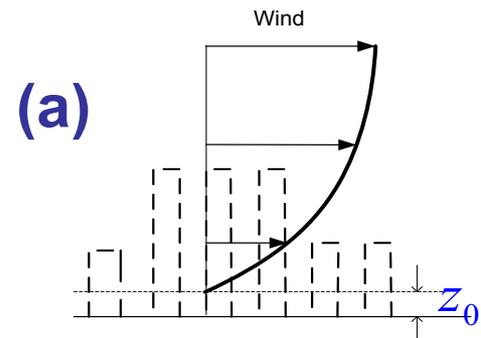
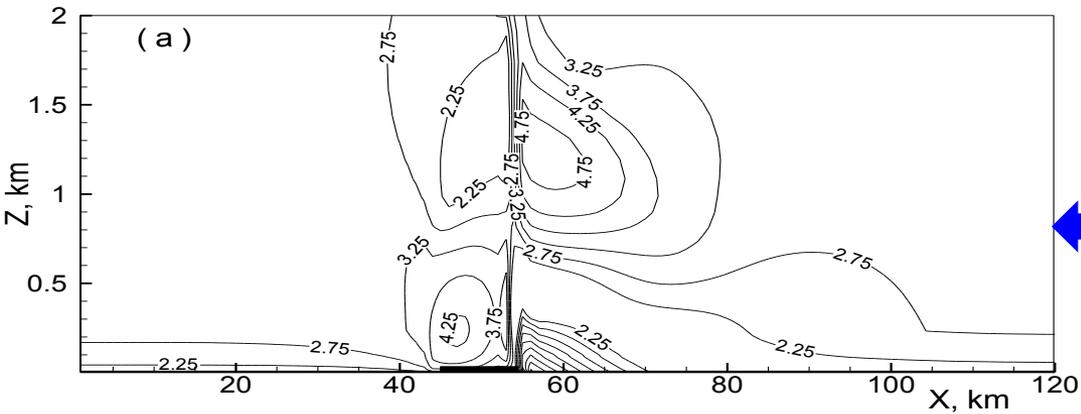
# Вертикальные разрезы потенциальной температуры и горизонтальной скорости ветра на 12:00

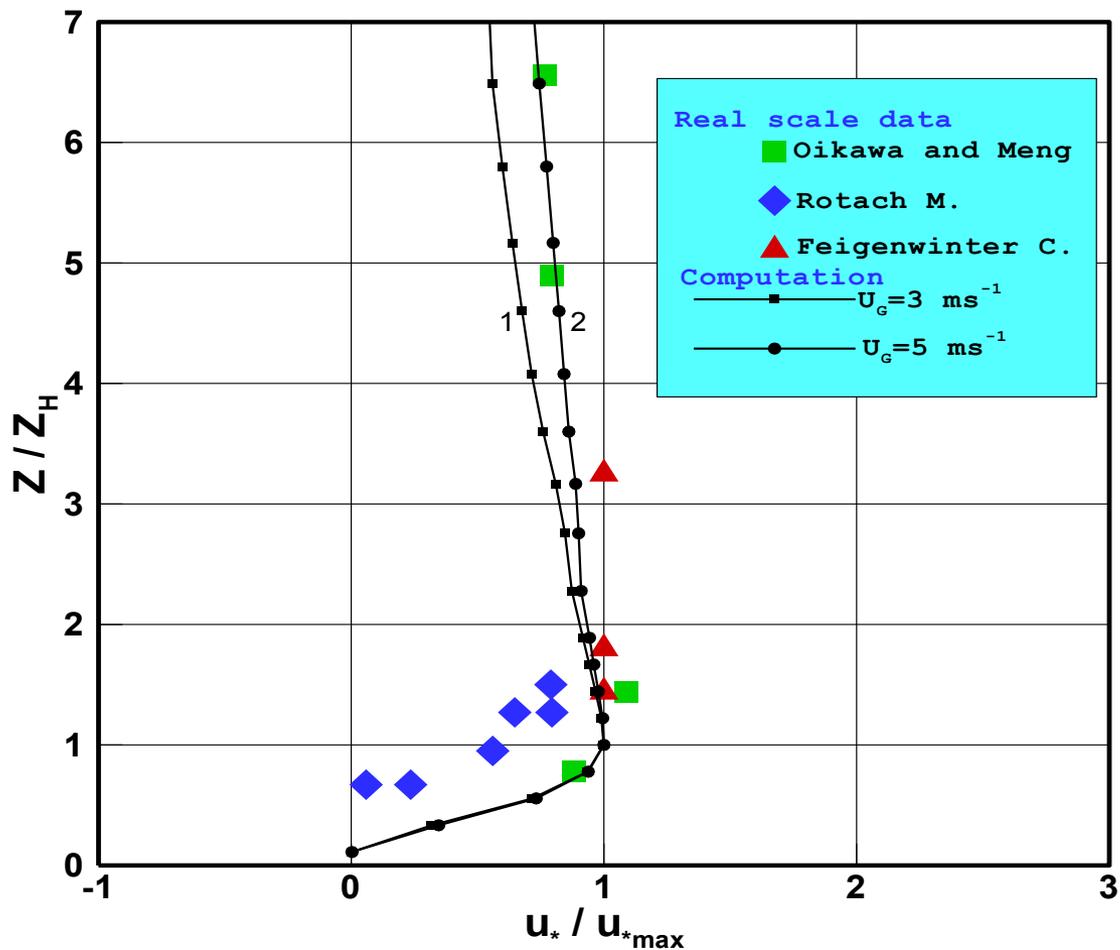


# Vector field of horizontal wind speed and isotachs for vertical velocity for 12:00



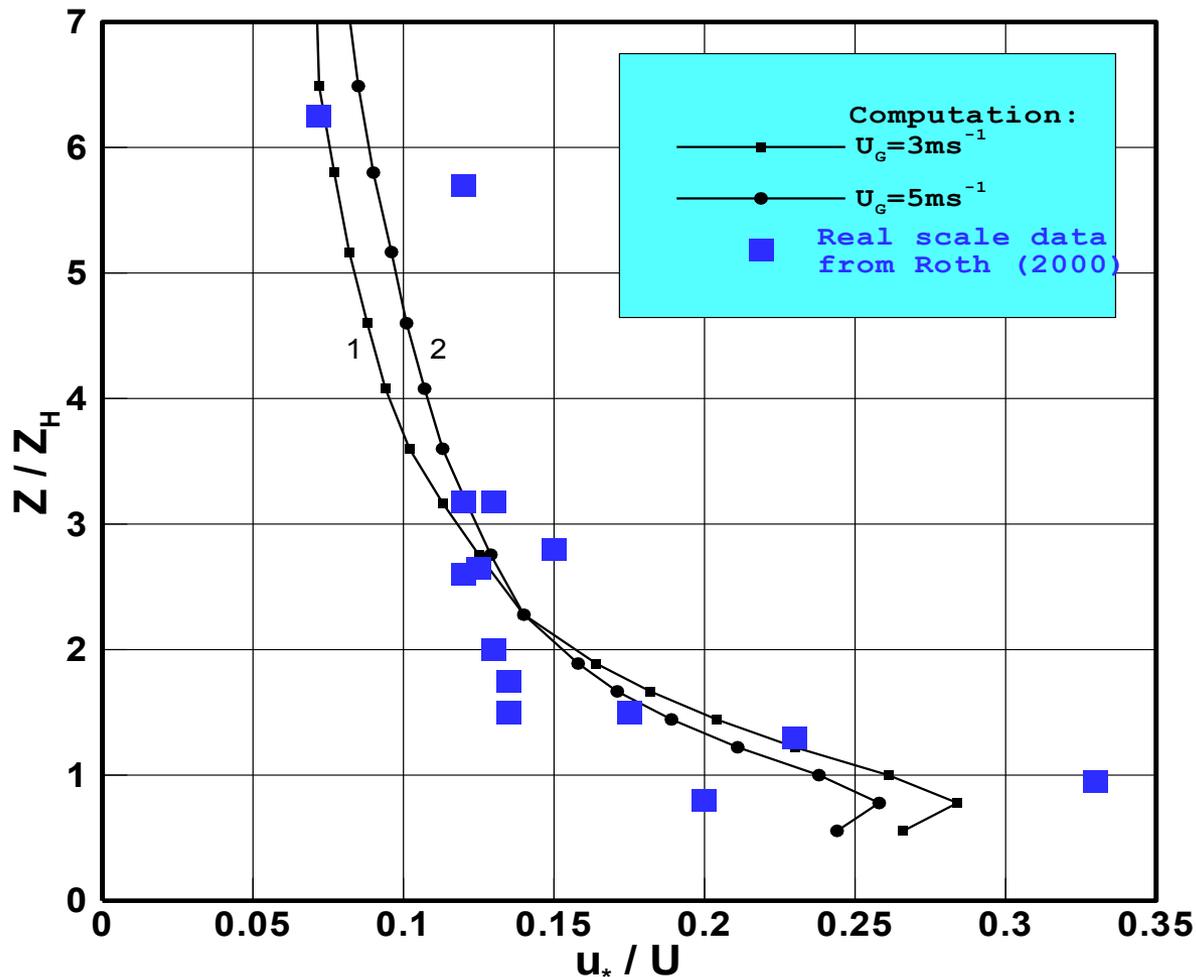
# Wind Speed Sensitivity to Urban roughness and Urban Heat Island



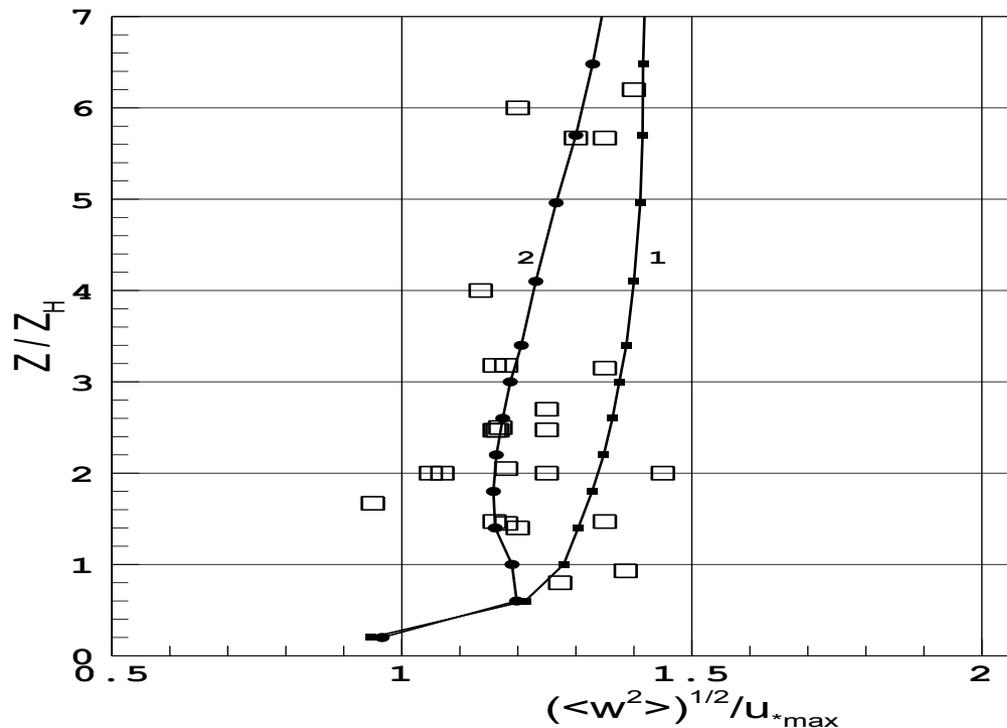


Вертикальные профили 'локальной' скорости трения в центре урбанизированной области, нормализованные на ее максимальное значение. Символами различной конфигурации показаны данные измерений:  $\blacklozenge$  - Rotach M.,  $\blacksquare$  - Oikawa and Meng,  $\blacktriangle$  - Feigenwinter C. Линия 1 - =3 м/сек, линия 2 - =5 м/сек. Вертикальная координата нормализована на среднюю высоту зданий в урбанизированной области .

# Вертикальные профили отношения $u_* / U$



Вертикальные профили отношения локальной скорости трения к средней скорости горизонтального ветра в центре урбанизированной области. Символы- данные измерений различных авторов



Вертикальный профиль стандартного отклонения для вертикальной скорости в центре урбанизированной поверхности. Линия 1 – моделирование при скорости  $U_G = 3$  м/сек, линия 2 – моделирование при скорости  $U_G = 5$  м/сек. Символами нанесены данные измерений .

**Thank you for your attention!**

