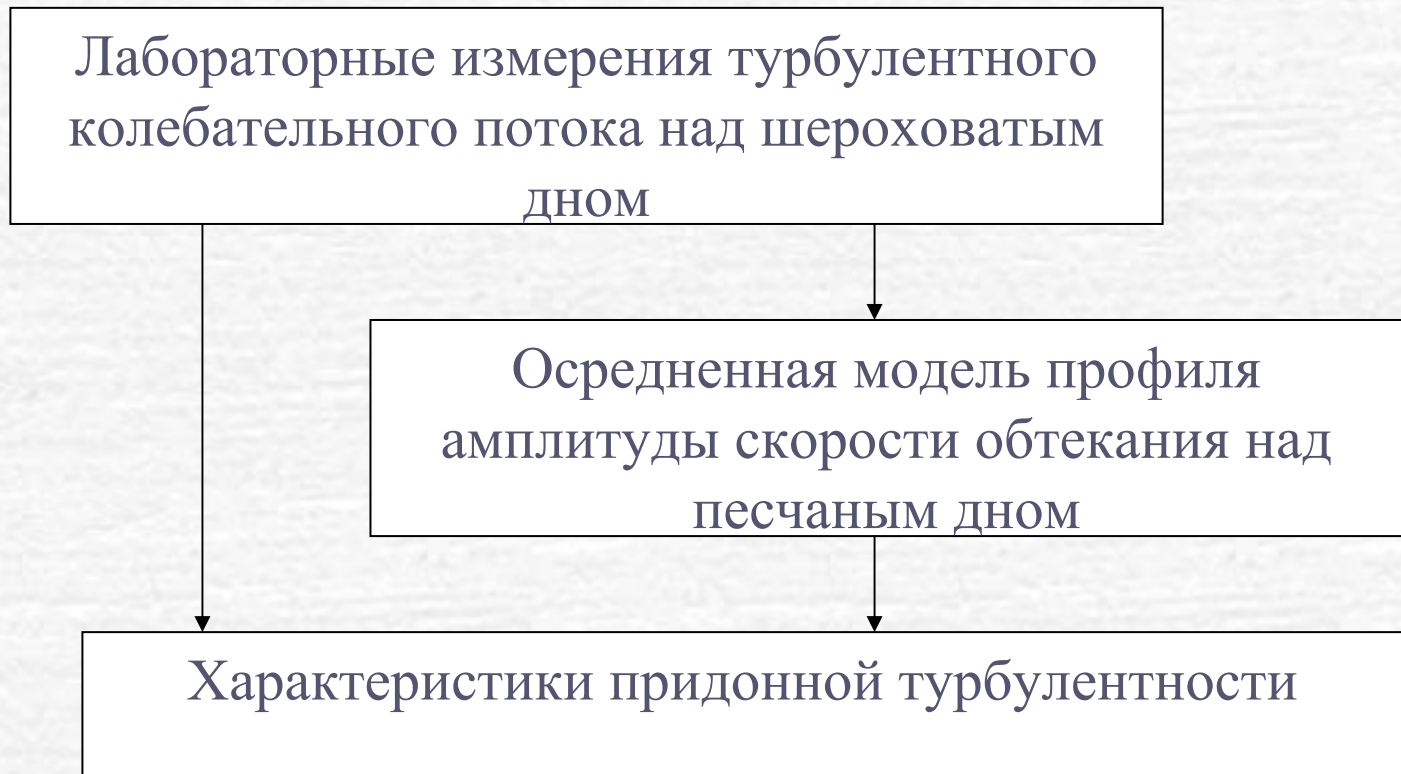


# ТУРБУЛЕНТНОСТЬ ПУЛЬСИРУЮЩЕГО ПОТОКА НАД ПЕСЧАНЫМ ДНОМ

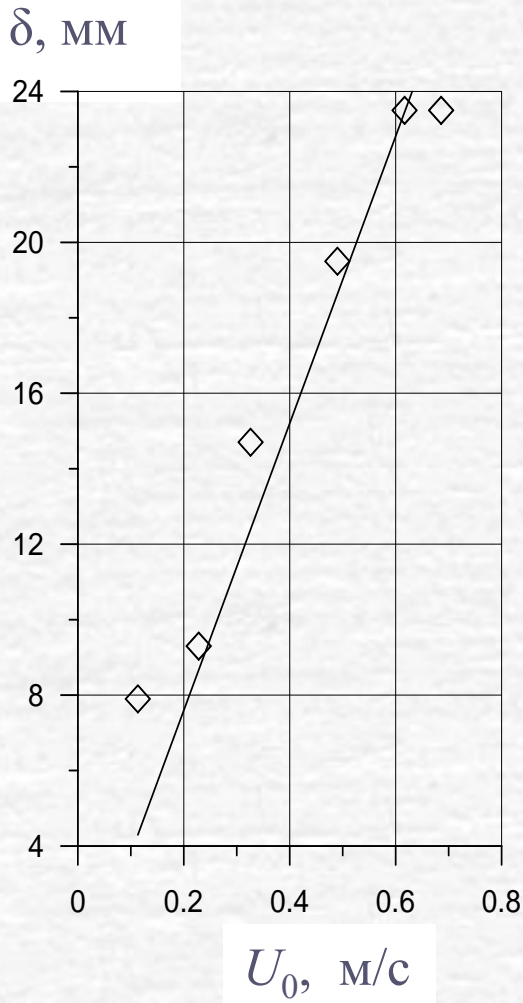
Ефремов О.И., Иванов В.А., Дыкман В.З.

Разработана модель пульсирующего придонного турбулентного пограничного слоя, предназначенная для применения в качестве одной из составляющих кинетического метода расчета вертикального распределения концентрации взвесей в прибрежной области моря. Модель основывается на данных лабораторных экспериментов, общим результатом которых является обнаружение значительных вариаций интенсивности турбулентности с удвоенной частотой в течение цикла колебаний скорости обтекания, причем амплитуда вариаций уменьшается с высотой, а сдвиг фазы линейно растет. Распределение по высоте средней интенсивности турбулентных флуктуаций скорости качественно совпадает с тем, которое наблюдается при устойчивых потоках. На этом основании строится осредненная модель придонного пограничного слоя, где фазовые сдвиги не учитываются, а все соотношения выводятся для амплитуд и средних значений рассматриваемых величин.

# Турбулентность Пульсирующего Потока Над Песчаным Дном



# Эмпирические Основания Модели 1



➤ Sleat J.F.A. Turbulent oscillatory flow over rough beds // J. Fl. Mech. 1987. – vol. 182. – P. 369 - 409

➤ Средний диаметр элементов шероховатости  $D$ , амплитуда скорости колебаний воды  $U_0$ , молекулярная вязкость воды  $\nu$ , амплитуда скорости трения  $u_*$ ,  $u_* = (-u'v')^{1/2}$ , толщина пограничного слоя  $\delta$

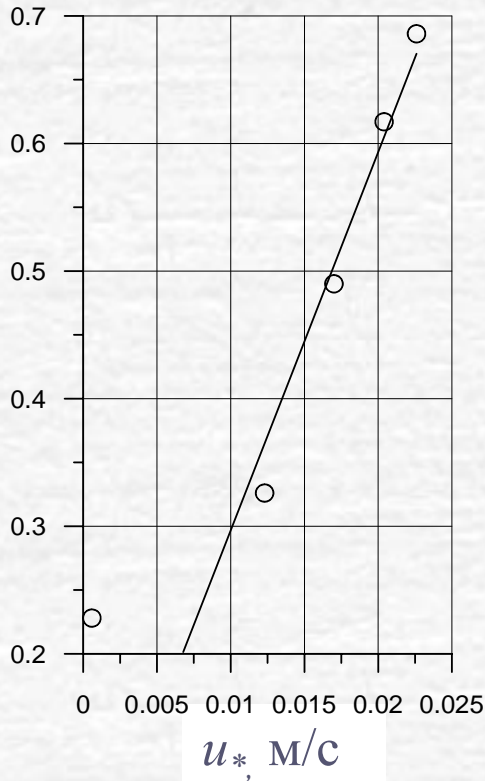
➤ Линейная аппроксимация дает соотношение

$$\delta = \theta U_0$$

$$\theta = 38 \cdot 10^{-3} \text{ с}, \quad D = 1,63 \text{ мм}$$

# Эмпирические Основания Модели 2

$U_0$ , м/с



- Линейная аппроксимация дает выражение

$$U_0 = 30 \cdot u_*$$

- Распределение по высоте средней интенсивности турбулентных флуктуаций скорости качественно совпадает с тем, которое наблюдается при устойчивых потоках. Этот факт может служить основанием для построения осредненной модели пульсирующего придонного пограничного слоя, где фазовые сдвиги не учитываются, а все соотношения выводятся для амплитуд и средних значений рассматриваемых величин

# Модельные Вертикальные Масштабы

$Z_1$  - вязкостный масштаб

$$z_1 = \nu / u_*$$

$Z_2$  - вихревой масштаб

$$z_2 = \theta u_*$$

$Z_3$  - автомодельный масштаб

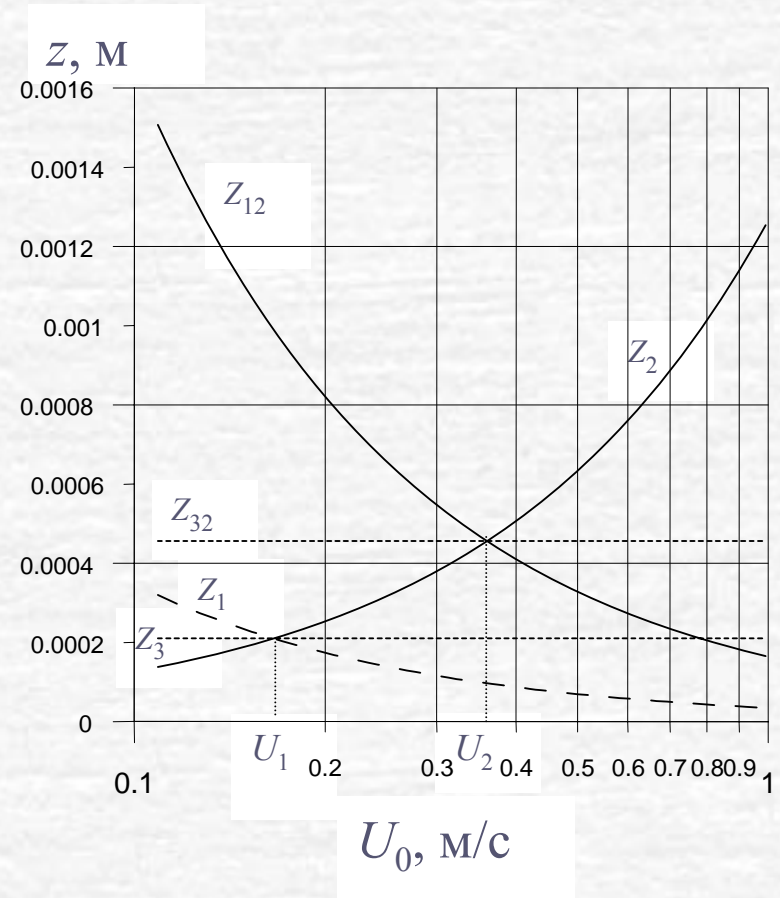
$$z_3 = \sqrt{z_1(U_1)z_2(U_1)} = \sqrt{\nu\theta}$$

$Z_{12}$  - увеличенный масштаб  $Z_1$

$$z_{12} = A_2^2 z_1 \quad U_2 = A_2 U_1$$

$Z_{32}$  - увеличенный масштаб  $Z_3$

$$z_{32} = A_2 z_3$$



# Логарифмический Пограничный Слой

Профиль средней скорости

$$U(z) = Au_* \ln(z/z_0) + Bu_*$$

$$U(z - z_b) = (u_* / \kappa) \ln(z - z_b) / z_0$$

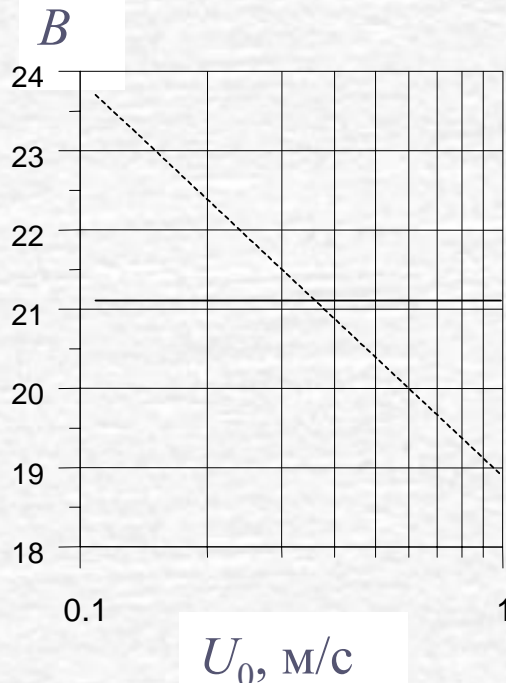
Высота вытеснения  $z_b = D$

$$y = z + D \quad A_2 = 1/\kappa_1 = 2,172$$

$$\kappa_1 = 0,46 \quad U_2 = A_2 U_1 = 0,36 \text{ м/с}$$

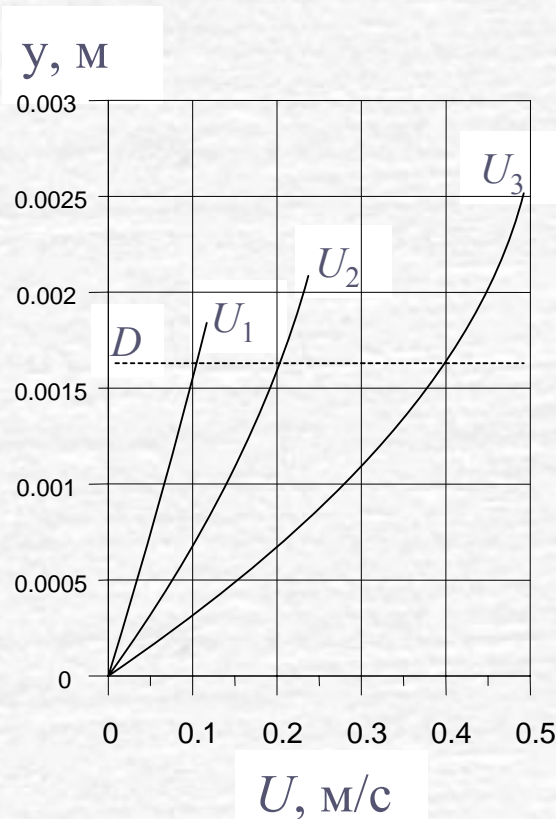
$$z_0 = z_2 \quad B = B_2 = 21,107$$

$$U(z) = A_2 u_* \ln\left(\frac{z}{z_2}\right) + B_2 u_*$$



- Последнее распределение амплитуд принимается в качестве модели для логарифмической части придонного пульсирующего пограничного слоя

# Параболический Пограничный Слой



Распределение амплитуд скорости

$$U(y) = a_0 + a_1 y + a_2 y^2 \quad U(0) = 0$$

$$y = y_2 = z_2 + D \quad U(y_2) = B_2 u_*$$

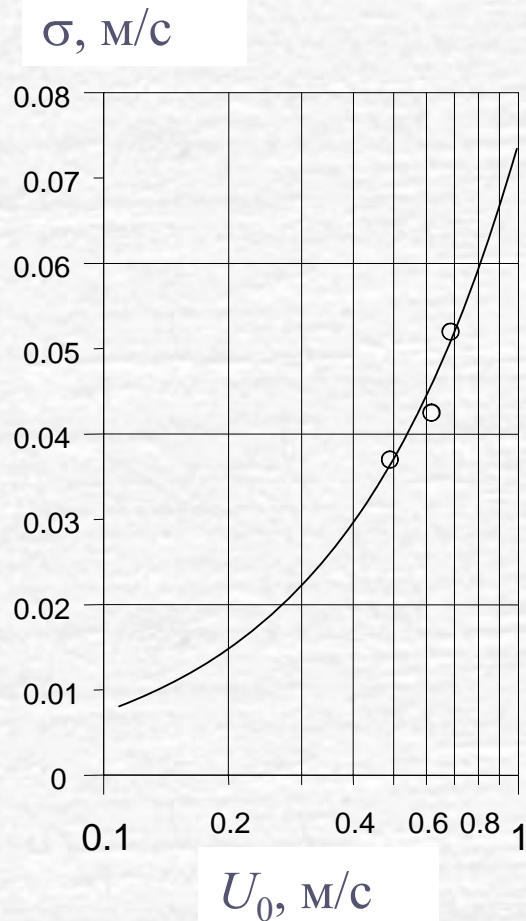
$$\left. \frac{\partial U}{\partial y} \right|_{y=y_2} = A_2 u_* / z_2 \quad a_0 = 0$$

$$a_1 = \frac{(2B_2 z_2 - A_2 y_2) u_*}{y_2 z_2}$$

$$a_2 = \frac{(A_2 y_2 - B_2 z_2) u_*}{y_2^2 z_2}$$

- В модельном представлении больше половины амплитуды скорости обтекания гасится в слое шероховатости, причем закон изменения скорости близок к линейному, как и в вязком подслое при гладком обтекании стенки устойчивым потоком

# Энергия Турбулентных Флуктуаций



По результатам измерений

$$\delta = U_0 \theta = 30 u_* \theta = u_* \phi \quad \phi = 30 \theta$$

$$E_T(z) = E_T(0) e^{-z/\sqrt{\nu_T} \phi} \quad \nu_T = u_*^2 \phi$$

$$\sqrt{\nu_T} \phi = \delta \quad E_T(0) = (3/2) \rho \sigma^2$$

$$E_T = \int_0^{\infty} E_T(z) dz = (3/2) \rho \sigma^2 \delta$$

$$1/2 \rho U(z_2)^2 z_2 = 3/2 \rho \sigma^2 \delta$$

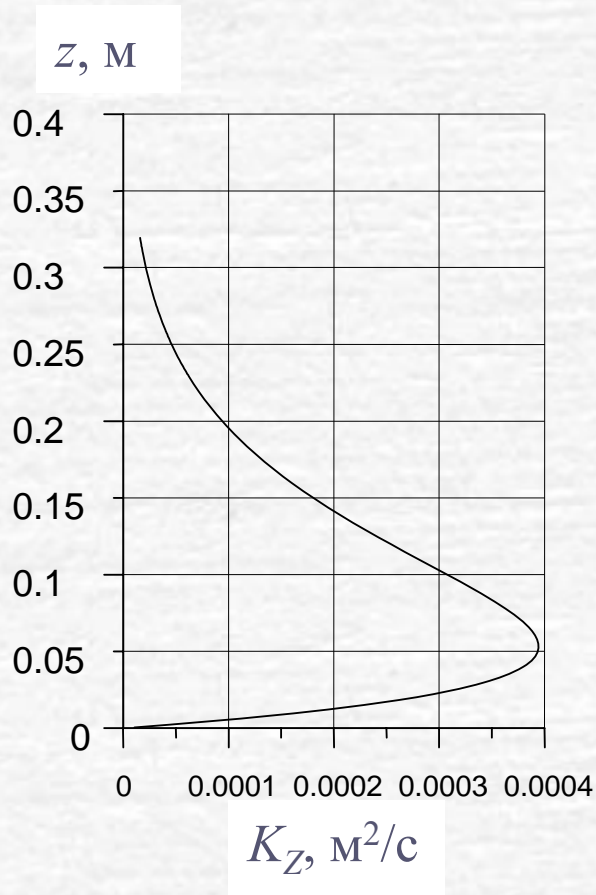
$$U(z_2) = B_2 u_* \quad \sigma = \sqrt{z_2 B_2^2 u_*^2 / 3 \delta}$$

$$\sigma(z) = \sigma(0) e^{-z/(2\delta)}$$

- Результаты расчетов согласуются с измерениями интенсивности турбулентных пульсаций горизонтальной компоненты скорости для трех амплитуд скорости обтекания



# Коэффициент Турбулентной Диффузии

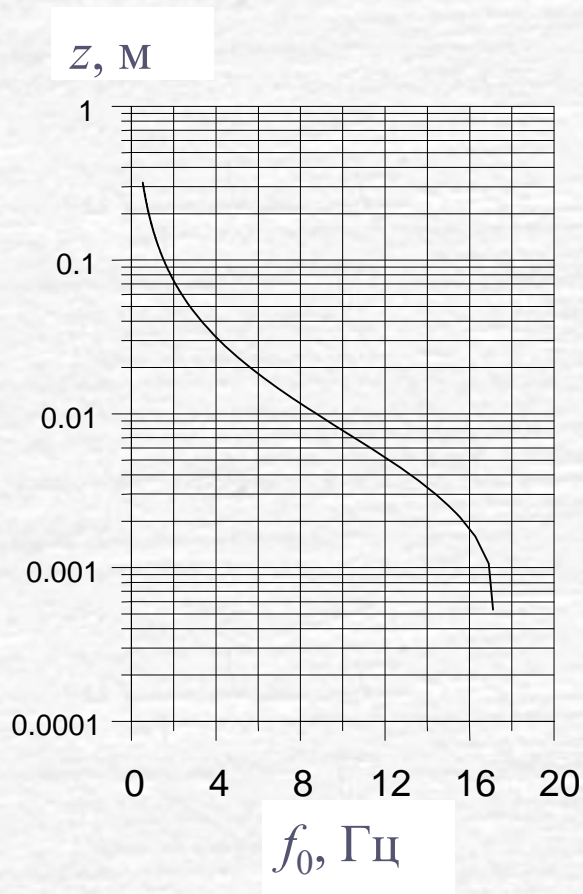


Турбулентный коэффициент обмена равен произведению типичной скорости на типичный масштаб длины

$$\sigma(z) = \sigma(0)e^{-z/(2\delta)} \quad l(z) = \kappa_1 z + D$$

$$K_z(z) = \sigma(0)e^{-z/(2\delta)} (\kappa_1 z + D)$$

# Частотные Свойства Придонной Турбулентности



Спектр придонной турбулентности имеет вид

$$S_2(\omega) = C_2 / \omega^2 \quad C_2 = \sigma_2^2 \omega_0 \quad \sigma_2^2 = \int_{\omega_0}^{\infty} S_2(\omega) d\omega$$

Средняя за цикл колебаний скорости обтекания граница  $\omega_0(z)$  может быть определена как частное от деления среднего модуля скорости на характерный горизонтальный масштаб турбулентности

$$\overline{U(z)} = 2U(z) / \pi \quad l_\Gamma(z) = \kappa_1 z + D + z_2$$

$$\omega_0(z) = \frac{2(A_2 \ln(z / z_2) + B_2) u_*}{\pi(\kappa_1 z + D + z_2)}$$

$$f_0(z) = \omega_0(z) / (2\pi)$$

Представленная полуэмпирическая модель пульсирующего пограничного слоя представляет собой удобный инструмент для расчета характеристик придонной турбулентности на мелководье. Модель предназначена для использования в качестве одной из составляющих метода расчета вертикального распределения массовой концентрации взвесей в прибрежной области моря

Наиболее важным для кинетического описания движения песчаных наносов является то обстоятельство, что генерируемая волнами на мелководье придонная турбулентность по отношению к подповерхностной является гораздо более высокочастотной, при сравнимых параметрах интенсивности