

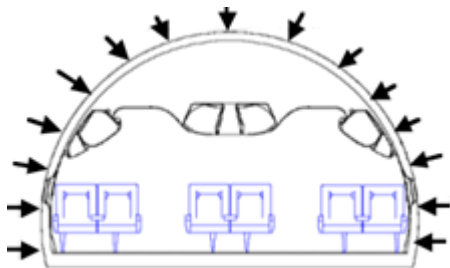
Возмущения поля пристеночных пульсаций давления выступающими телами в турбулентном пограничном слое

А.Ю. Голубев, С.В. Кузнецов

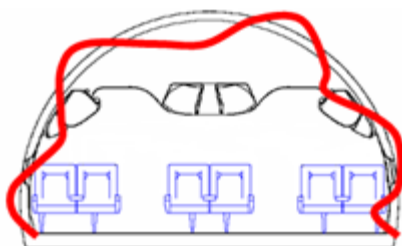
Центральный аэрогидродинамический институт им. проф. Н.Е. Жуковского

Введение

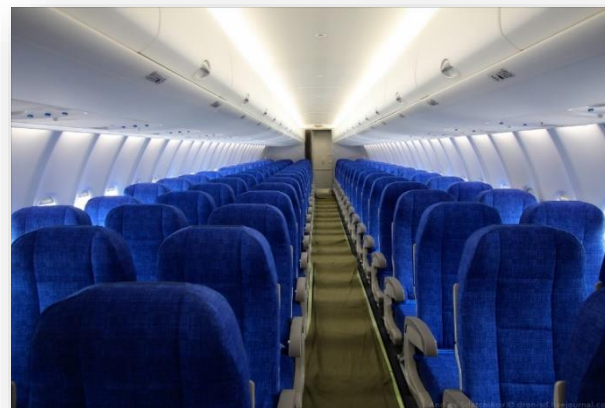
Пульсации давления



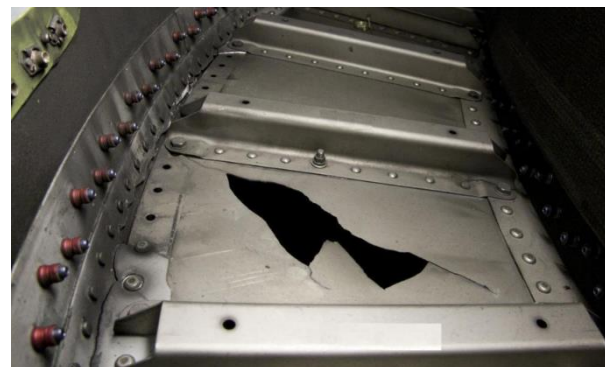
Колебания конструкции



Шум в салоне

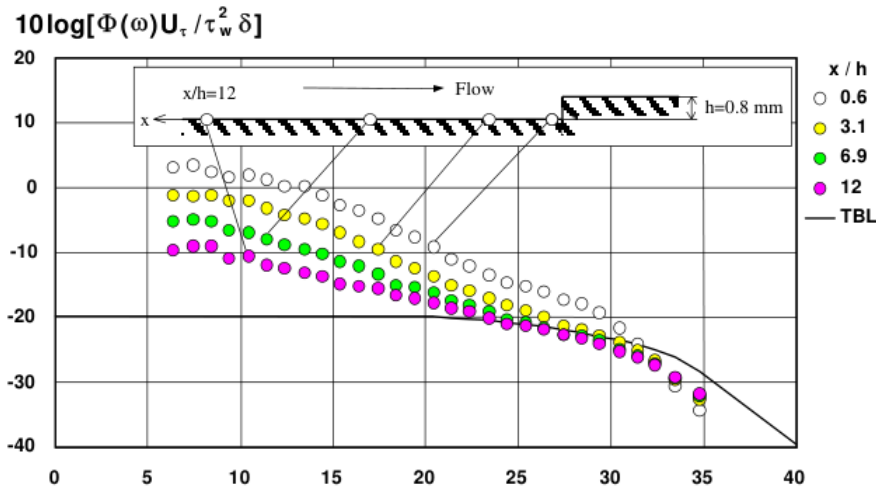


Усталостная прочность



Введение

Пульсации давления в окрестности прямых и обратных уступов в турбулентном пограничном слое

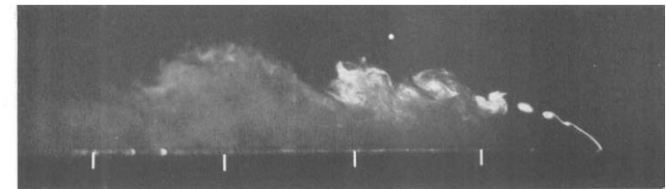


Efimtsov et al. //

AIAA Paper, 1999. 99-1964

AIAA Paper, 2000. 2000-2053

AIAA Paper, 2002. 2002-2605



Механизмы образования пульсаций давления.

Kiya & Sasaki // JFM, 1983. V. 13.

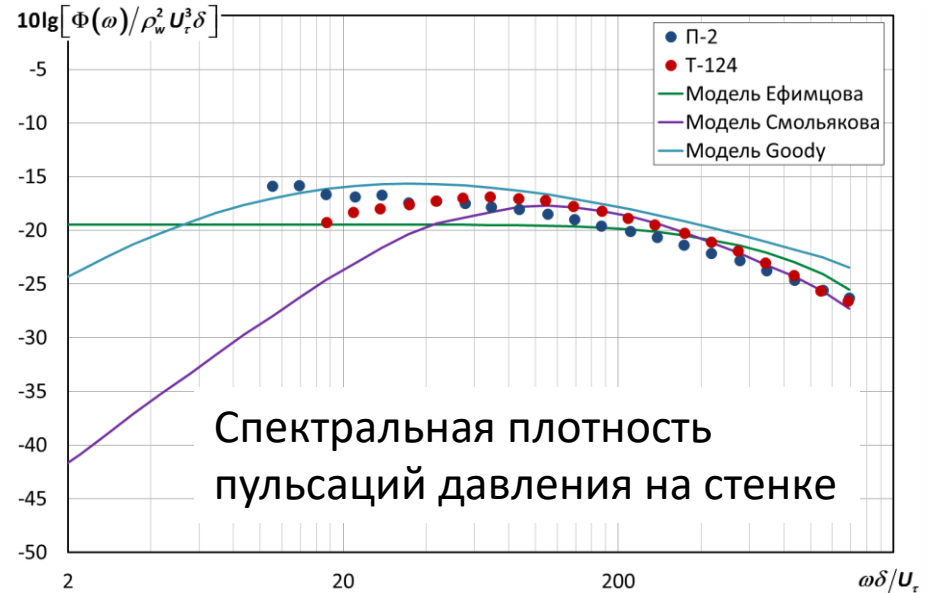
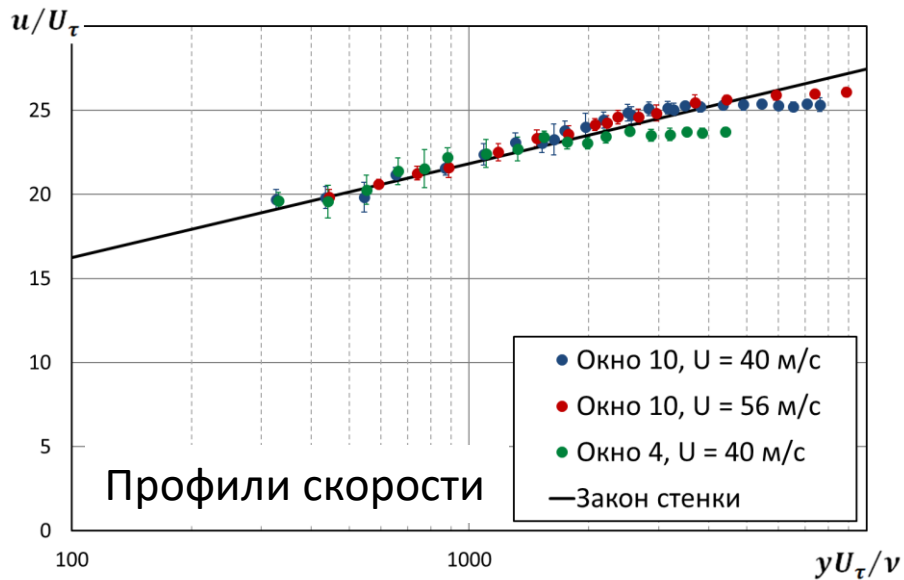
Cherry et al. // JFM, 1984. V. 144.

1. Колебания линии отрыва и области возвратного течения $fx_r / U < 0.2$
2. Сдвиговая неустойчивость слоя смешения $fx_r / U \approx 0.5$

f – частота; x_r – длина области возвратного течения;

U – скорость набегающего потока

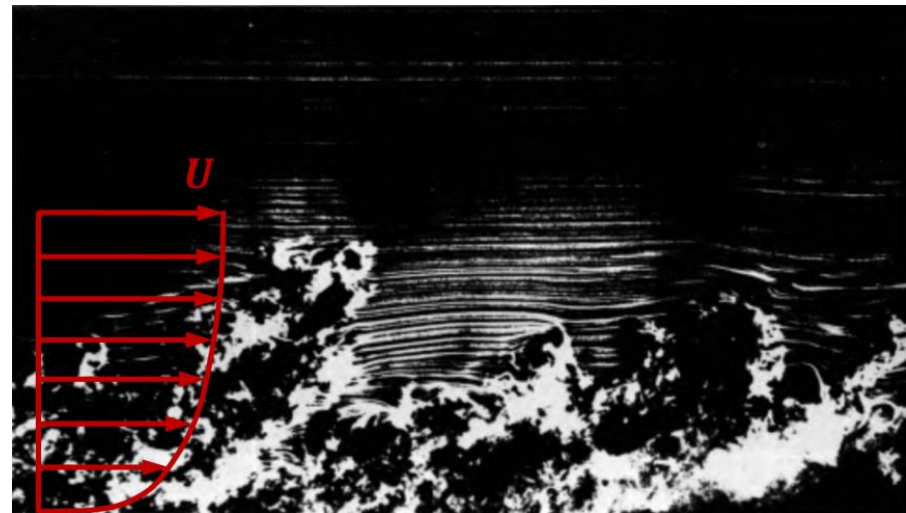
Экспериментальная установка



Параметры набегающего потока

	δ , мм	δ^* , мм	ϑ , мм	U_τ / U	C_f	Re_ϑ	Re_τ
Окно 10, $U = 40$ м/с	35	3.3	2.6	0.040	0.0031	7150	3810
Окно 10, $U = 56$ м/с	35	3.3	2.7	0.038	0.0029	10400	5180
Окно 4, $U = 40$ м/с	20	2.0	1.6	0.042	0.0035	4300	2540

- δ – толщина пограничного слоя (по $0,99U$)
 δ^* – толщина вытеснения
 ϑ – толщина потери импульса
 U_τ – динамическая скорость
 ν – кинематический коэффициент вязкости
 $q = \rho U^2 / 2$ – скоростной напор
 $C_f = \tau / q$ – коэффициент трения на стенке
 $Re_\vartheta = U\vartheta / \nu$
 $Re_\tau = U_\tau \delta / \nu$



М. Ван-Дайк. Альбом течений жидкости и газа

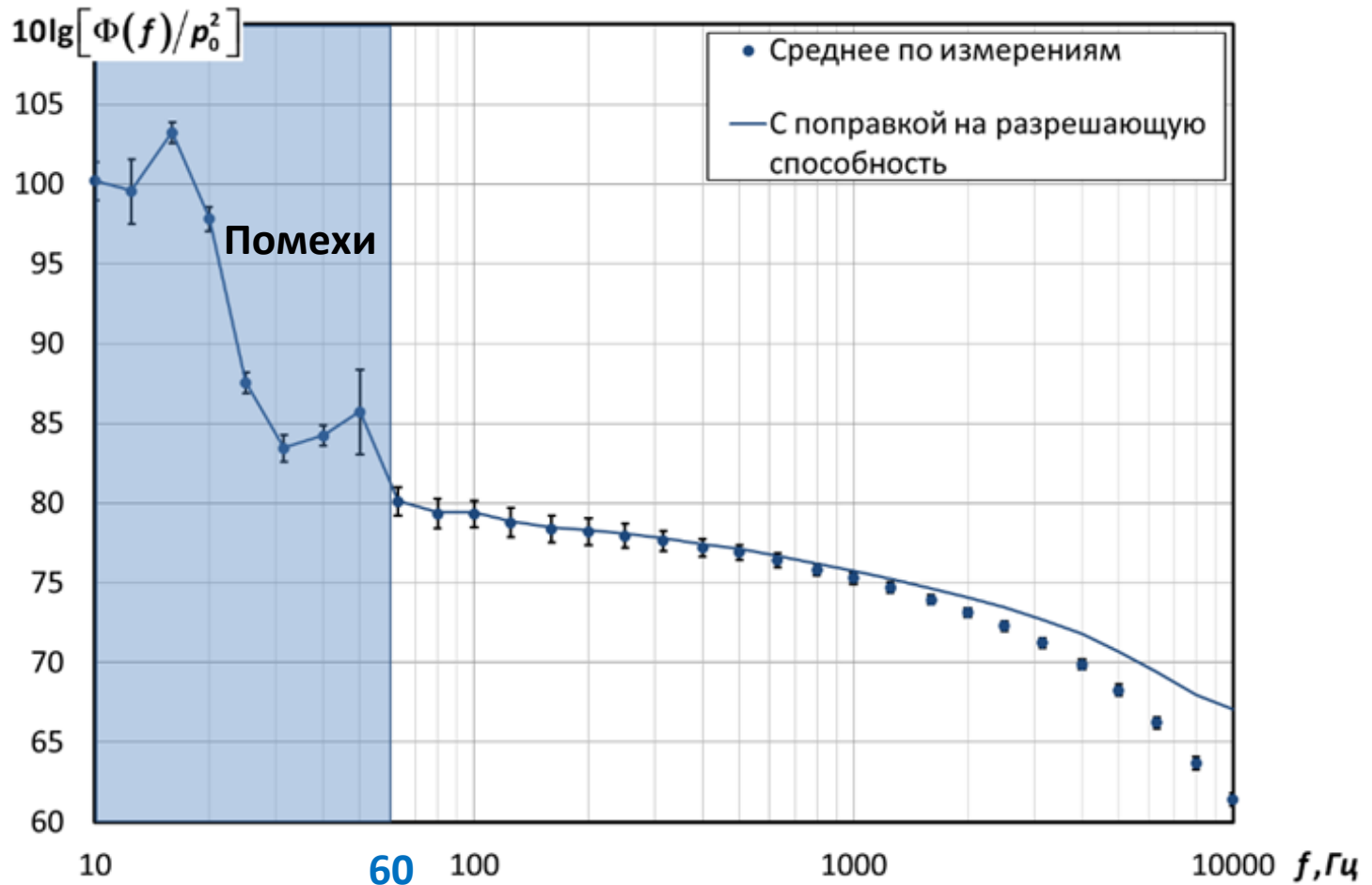
Оценка погрешностей измерений

Выступление/утопание датчиков

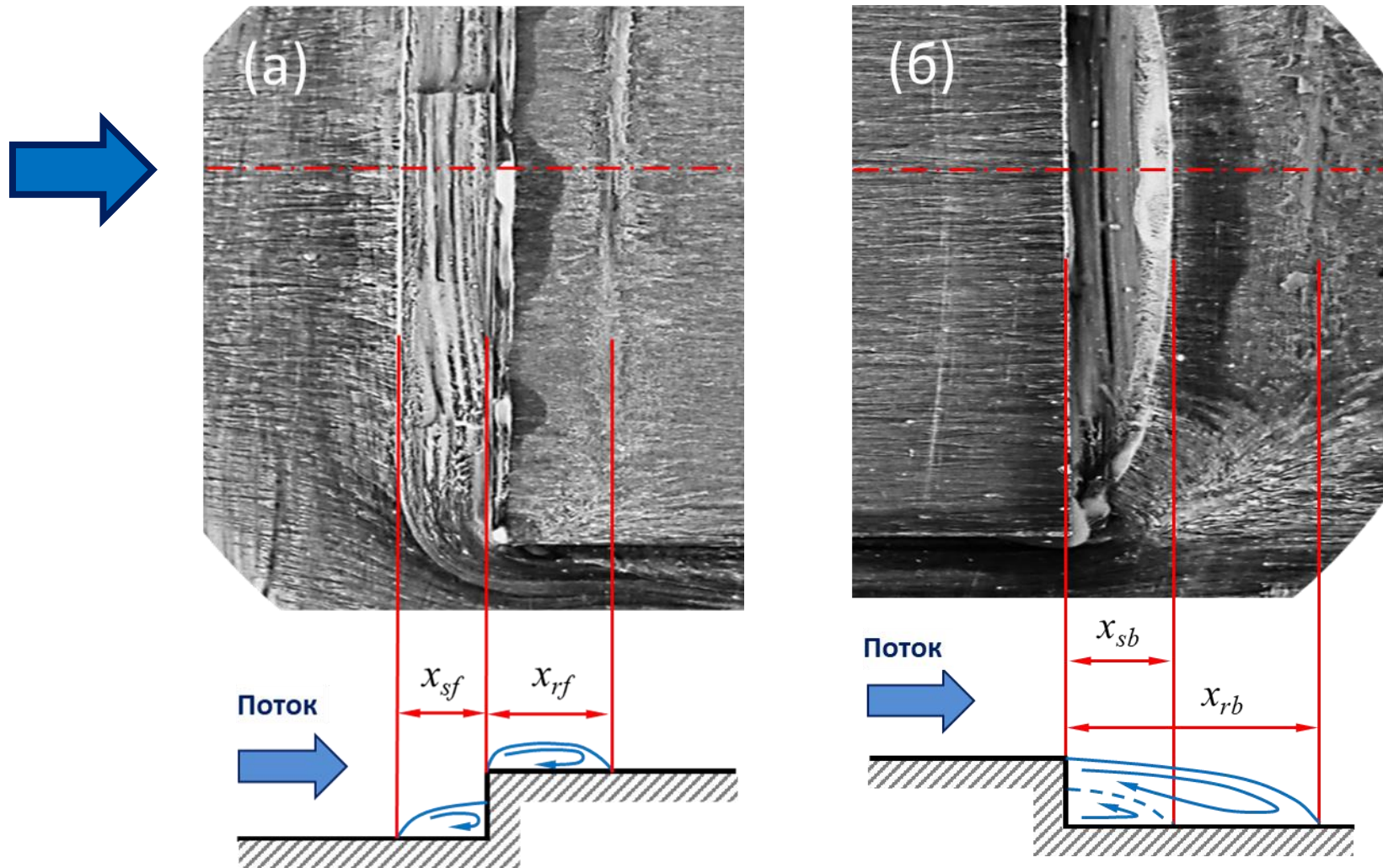
Efimtsov B.M. et al. // AIAA Paper 2005-800

Разрешающая способность

Corcos G.M. // JASA, 1963. V.35. N.2

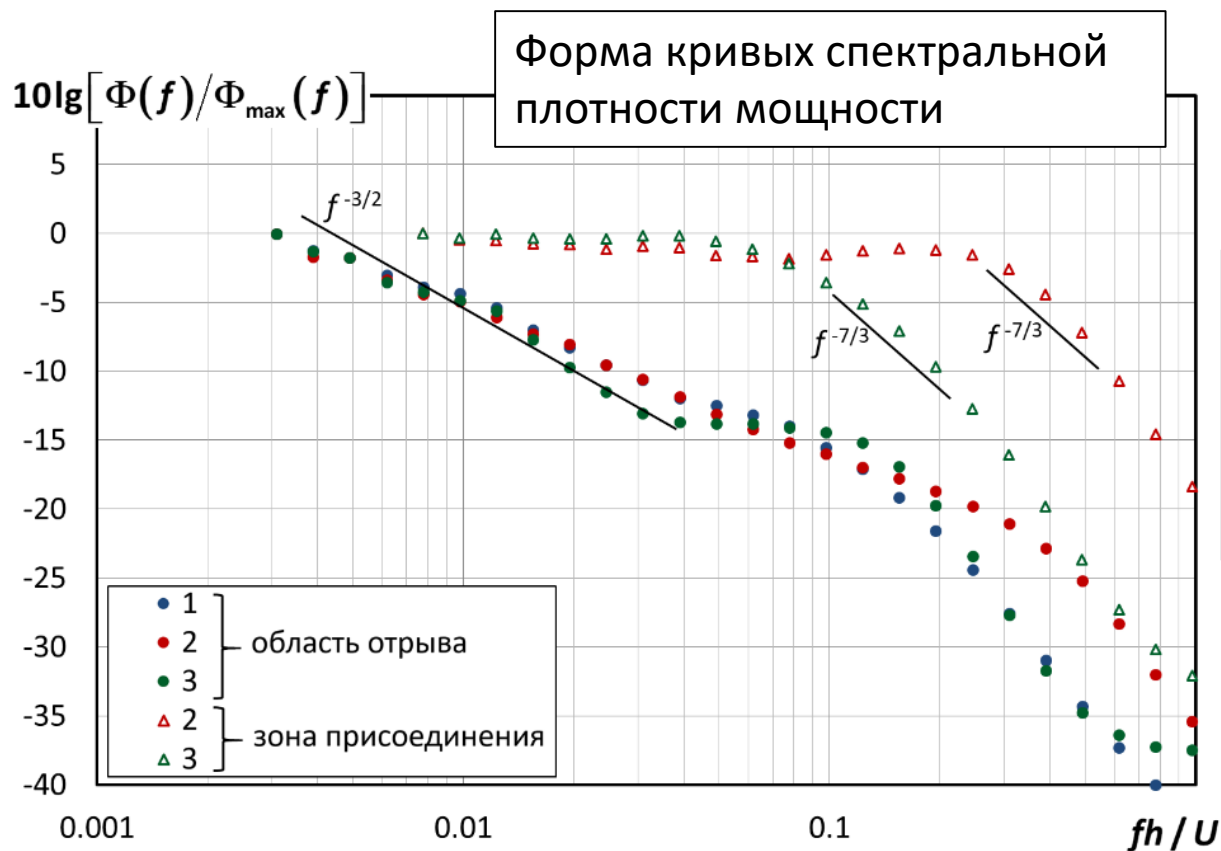


Пристеночные пульсации давления в двумерных отрывных течениях внутри турбулентного пограничного слоя



Визуализация обтекания (а) прямого и (б) обратного уступов

Спектры пристеночных пульсаций давления в двумерных отрывных течениях внутри турбулентного пограничного слоя

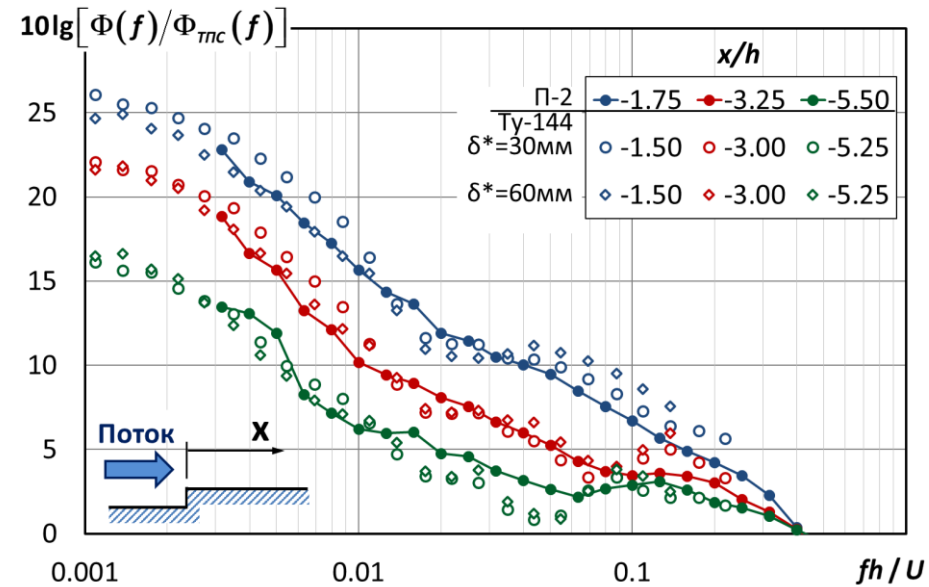
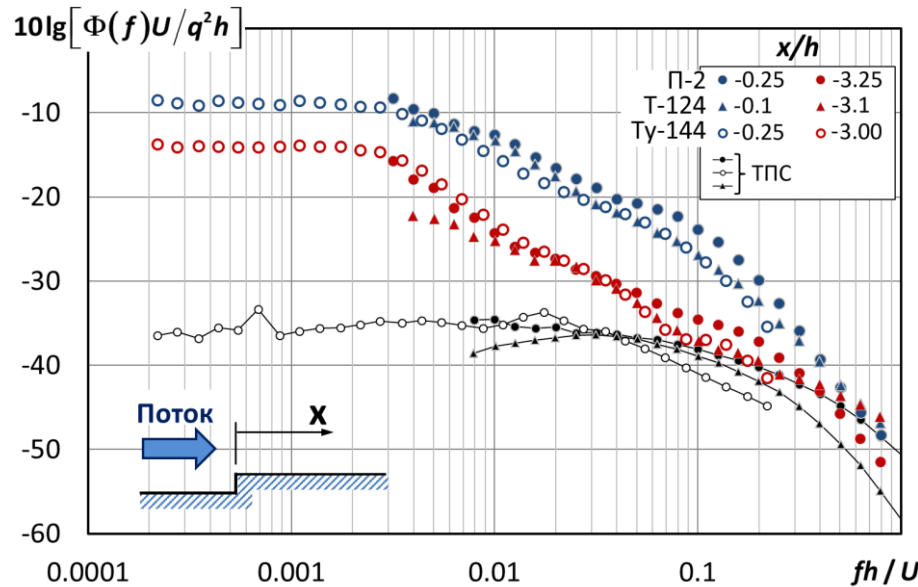


Переход к зависимости $f^{-7/3}$ определяется числом Струхаля:
 $fx_r/U = 0.5$ (прямой уступ)
 $fx_r/U = 0.3$ (обратный уступ)

1 – перед прямым уступом
 2 – за прямым уступом
 3 – за обратным уступом

Высота уступа $h = 4$ мм
 Скорость набегающего потока $U = 40$ м/с

Сравнение результатов, полученных на различных экспериментальных установках и в лётных измерениях



Превышение над ТПС неизменно во всех измерениях

П-2: $M = 0.12$
 $h/\delta^* = 1.21$
 $Re_{\delta^*} = 0.9 \cdot 10^4$
 $h = 4 \text{ мм}$

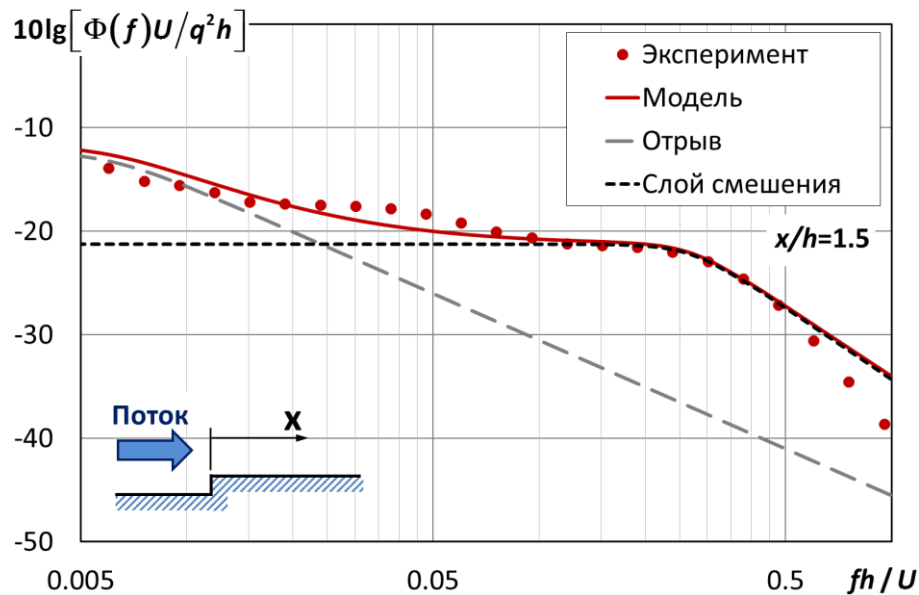
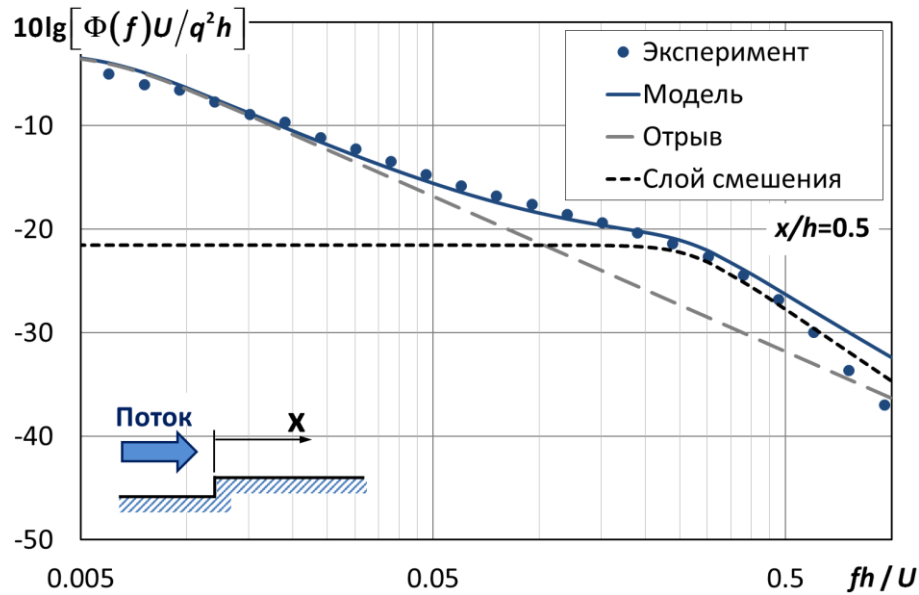
ТУ-144: $M = 0.57$
 $h/\delta^* = 0.14$
 $Re_{\delta^*} = 2.5 \cdot 10^6$
 $h = 4 \text{ мм}$

Т-124: $M = 0.15$
 $h/\delta^* = 0.70$
 $Re_{\delta^*} = 2.5 \cdot 10^4$
 $h = 5 \text{ мм}$

Efimtsov et al. (2002)

Efimtsov et al. (1999)

Моделирование спектральной плотности пристеночных пульсаций давления в окрестности прямых и обратных уступов



$$\frac{\Phi(f)U}{q^2h} = F_{omp} + F_{смеш}$$

$$F_{omp}(Sh, x/h) = \frac{\alpha_{omp}(x/h)}{\left[1 + \left(\frac{Sh}{Sh_{0,omp}}\right)^{3*3/2}\right]^{1/3}}$$

$h = \text{fix}$
 $\delta = \text{fix}$
 $M = \text{fix}$

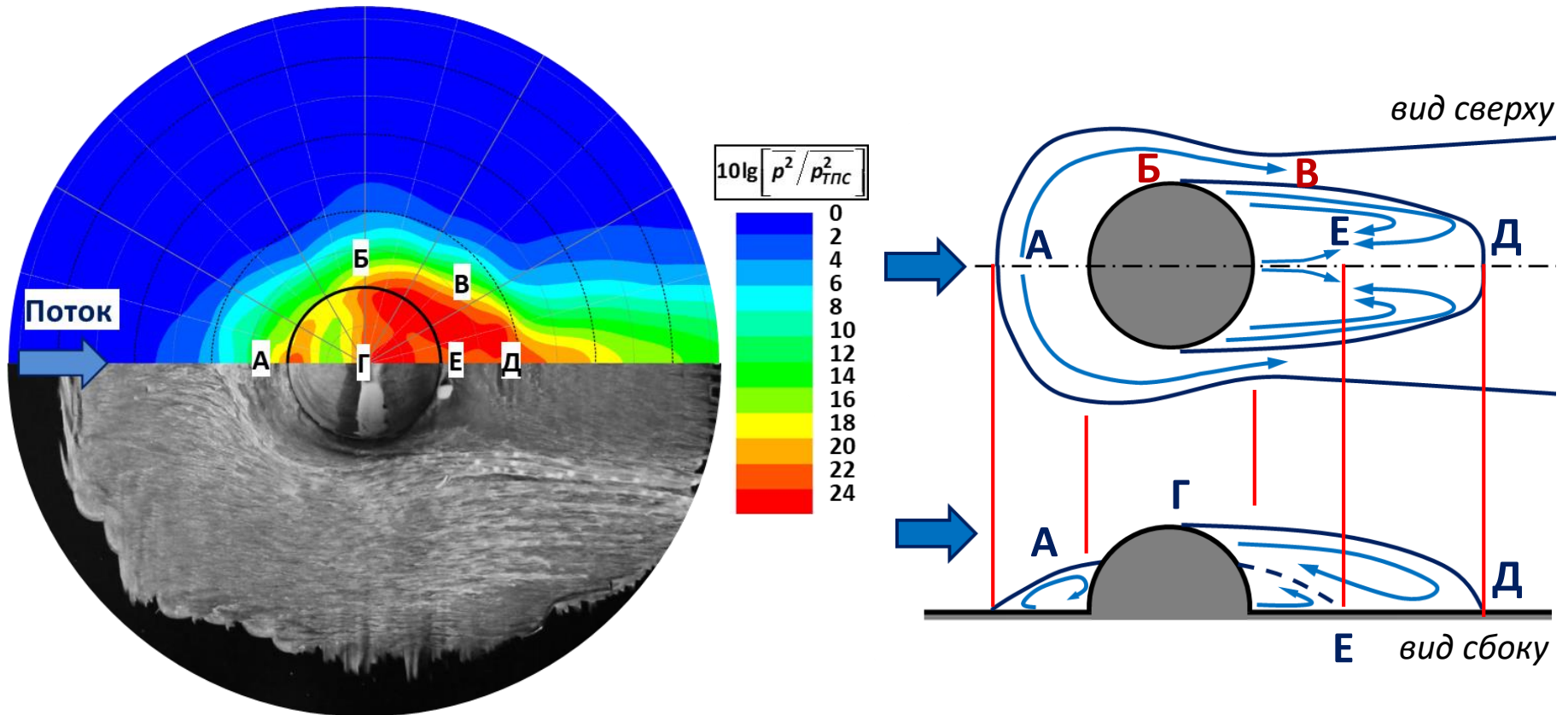
$$F_{смеш}(Sh, x/h) = \frac{\alpha_{смеш}(x/h)}{\left[1 + \left(\frac{Sh}{Sh_{0,смеш}}\right)^{3*7/3}\right]^{1/3}}$$

$h = \text{fix}$
 $\delta = \text{fix}$
 $M = \text{fix}$

$$\alpha_{omp} = f_1\left(\frac{x}{h}, \frac{h}{h_0}, M, \{ТПС\}\right) \quad Sh_{0,omp} = f_2\left(\frac{h}{h_0}\right)$$

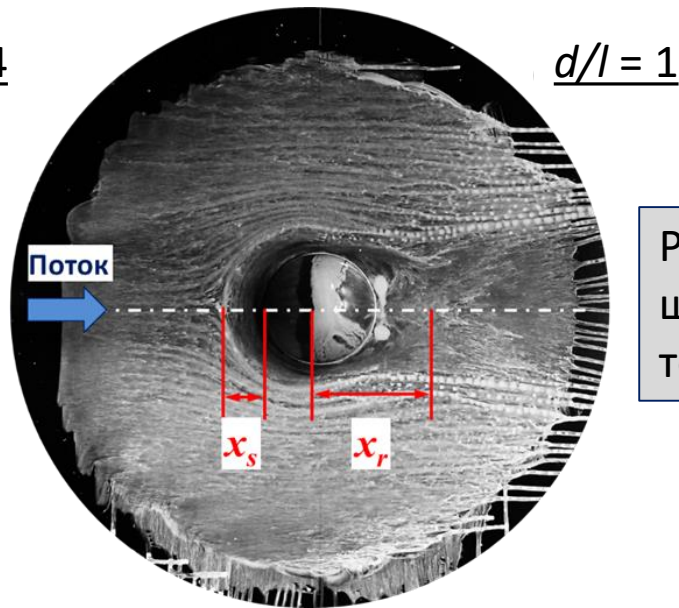
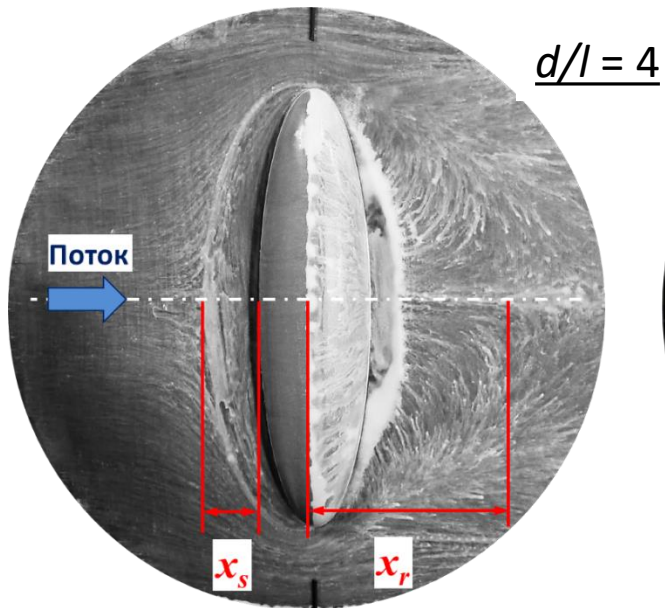
$$\alpha_{смеш} = f_3\left(\frac{x}{h}, \frac{h}{h_0}, M\right) \quad Sh_{0,смеш} = \text{const}$$

Пристеночные пульсации давления в трёхмерных отрывных течениях внутри турбулентного пограничного слоя

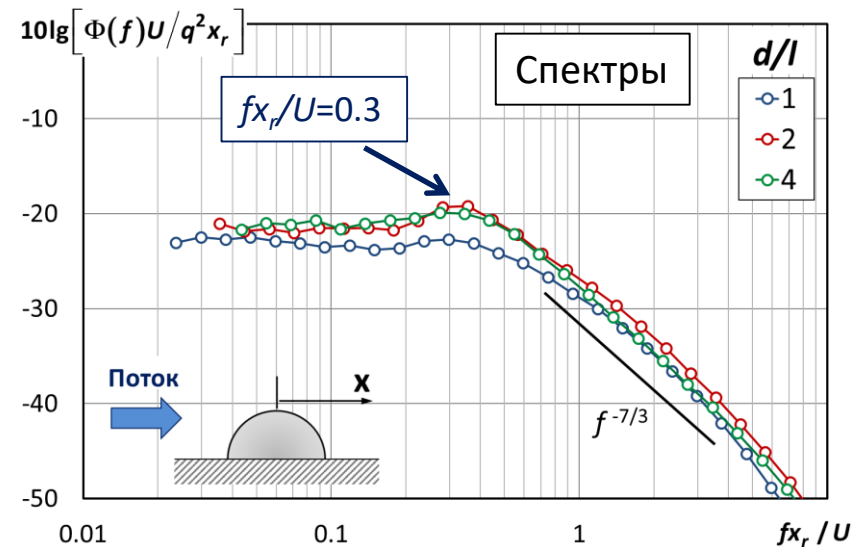
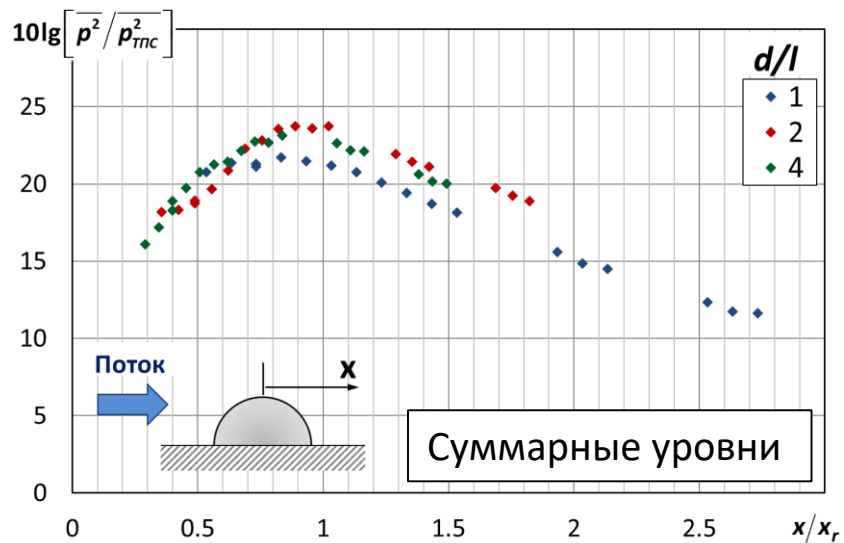


- А: отрыв и присоединение ТПС
- Б: отрыв потока с боковой поверхности модели
- В: слой смешения сбоку от полусферы
- Г: отрыв потока с верхней поверхности модели
- Д: присоединение слоя смешения
- Е: вторичный отрыв возвратного течения

Трансформация поля пристеночных пульсаций давления при переходе от двумерного осреднённого течения к трёхмерному

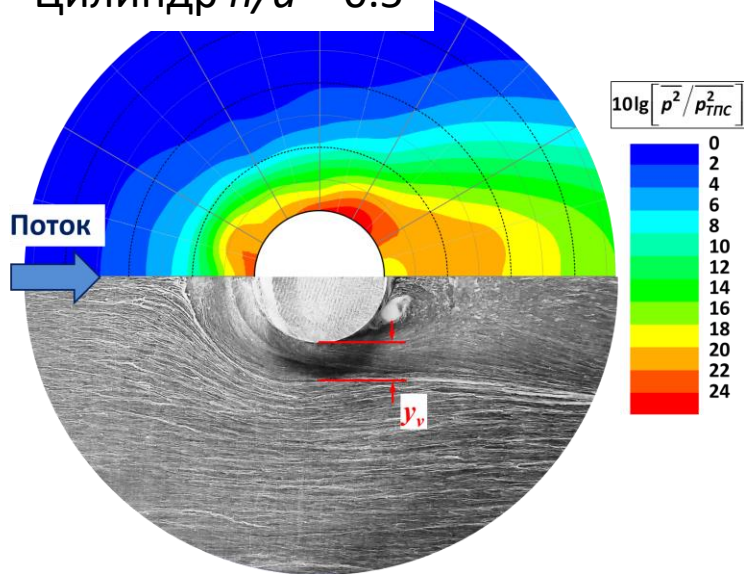


Различное отношение ширины выступающего тела d к длине l

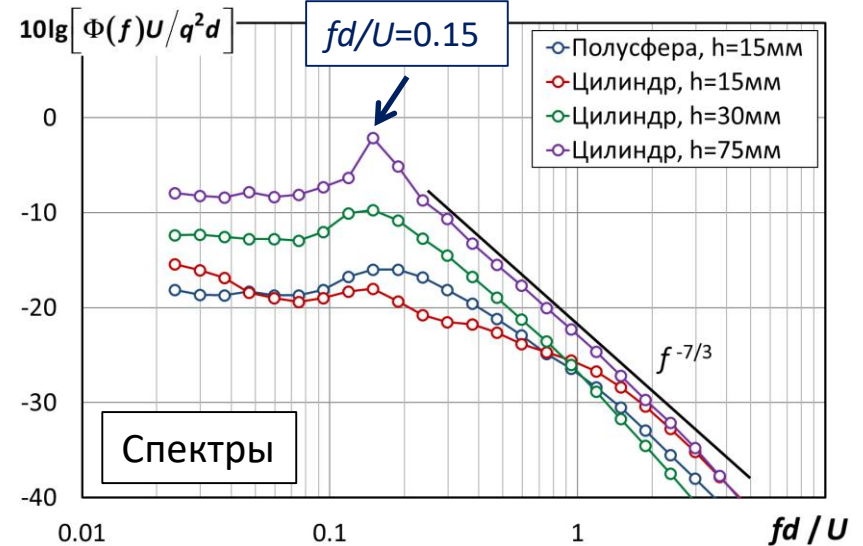
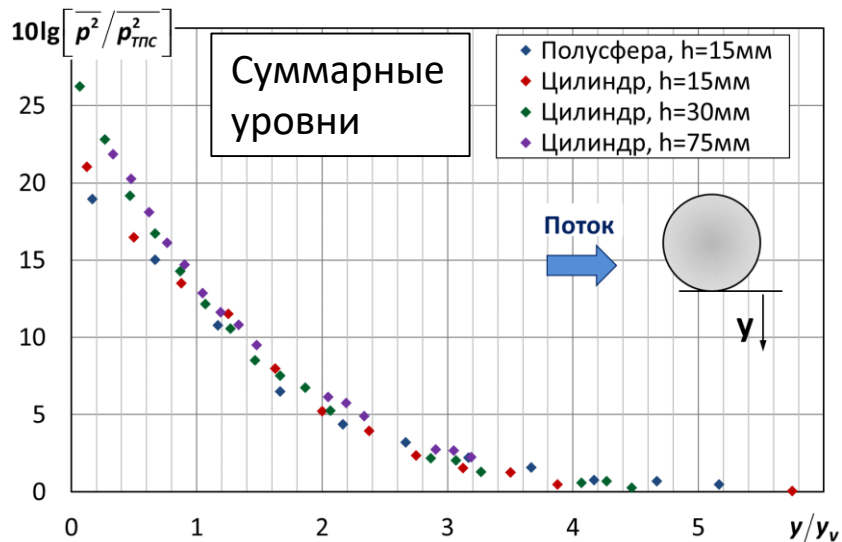
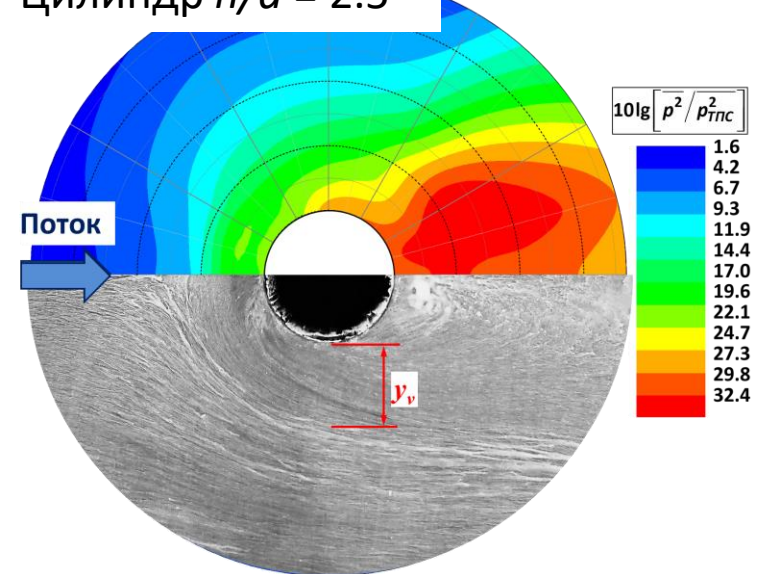


Пристеночные пульсации давления, образующиеся при отрыве потока с боковой поверхности выступающего тела

Цилиндр $h/d = 0.5$

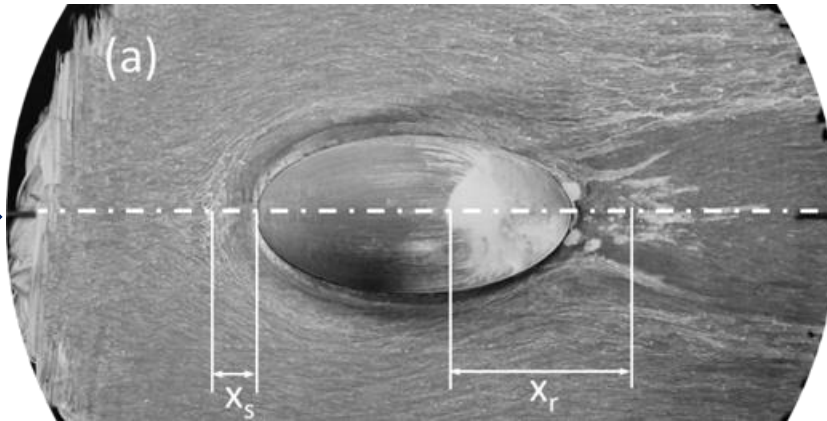


Цилиндр $h/d = 2.5$

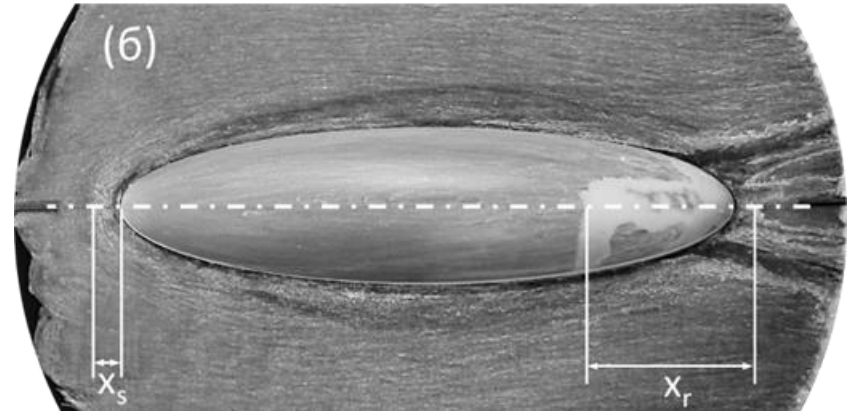


Влияние удлинения выступающего тела

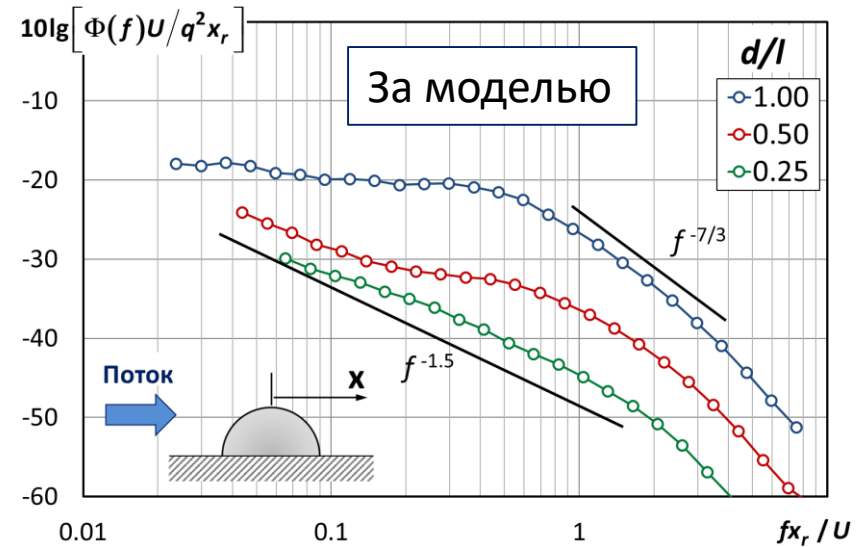
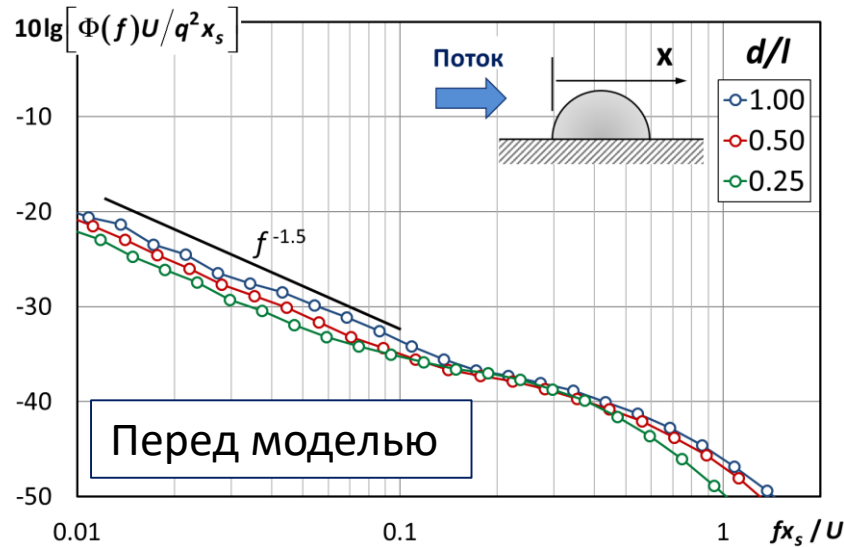
Поток

$d/l = 0.50$

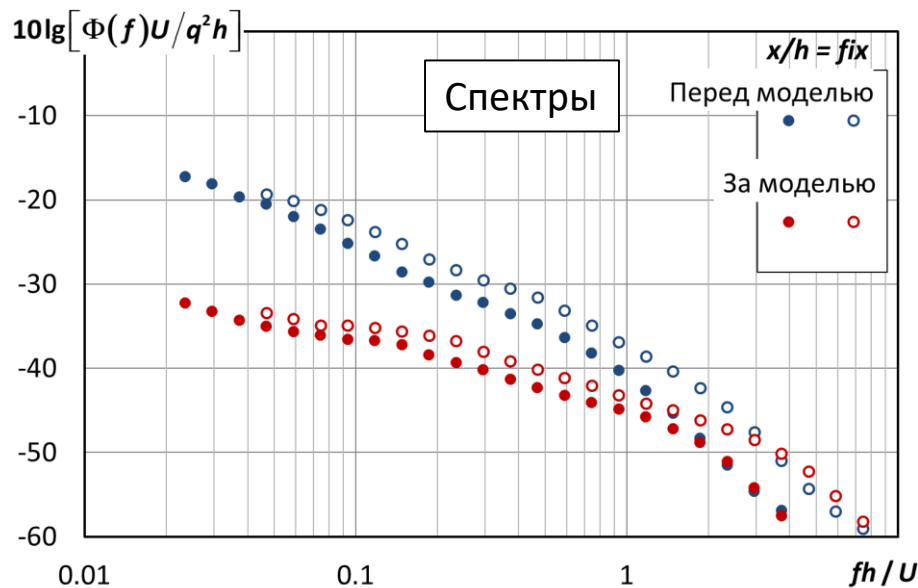
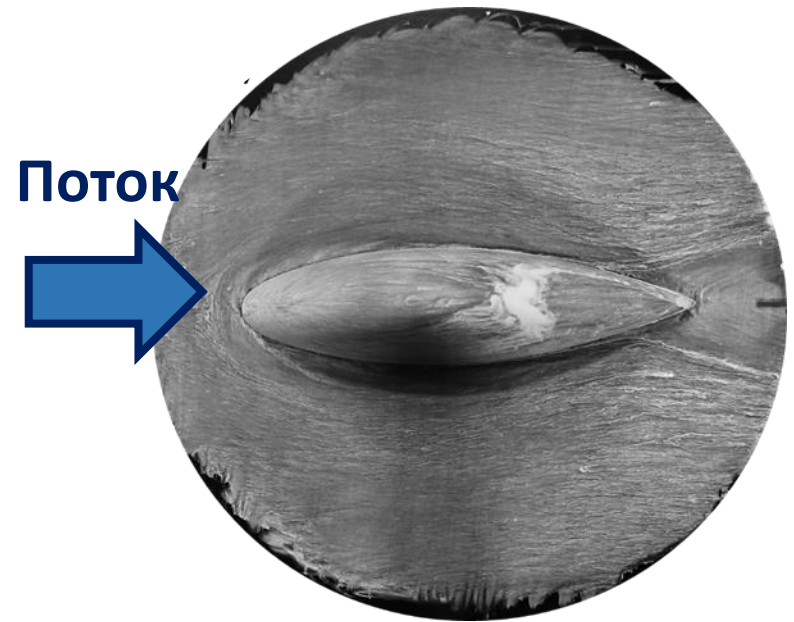
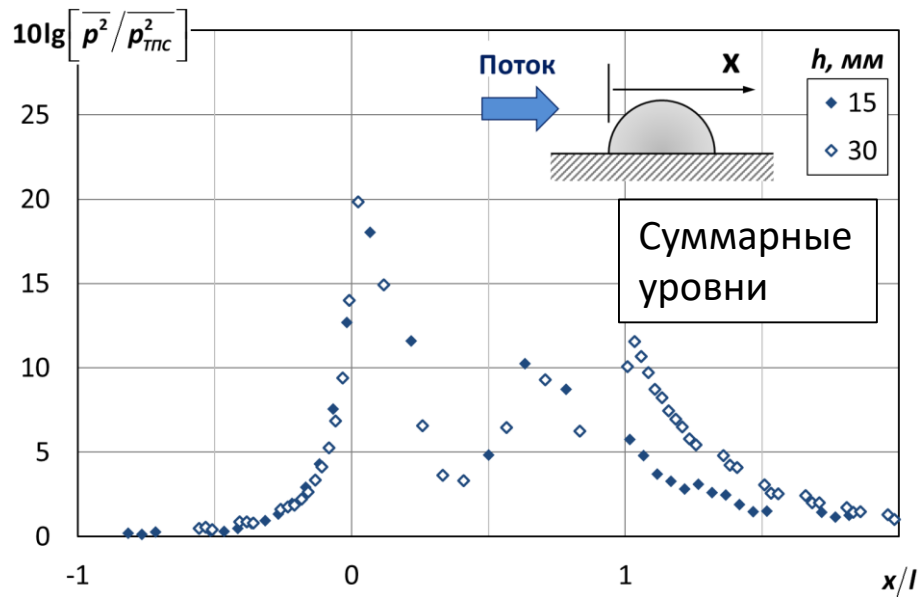


$d/l = 0.25$



Значительное ослабление отрыва с поверхности модели

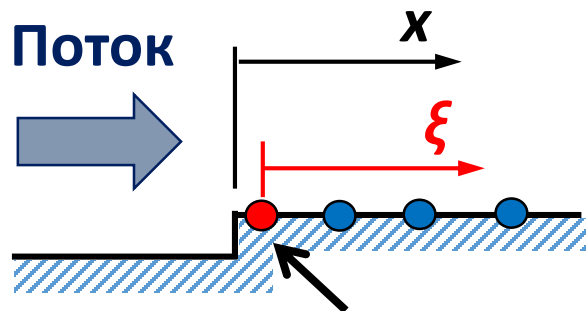
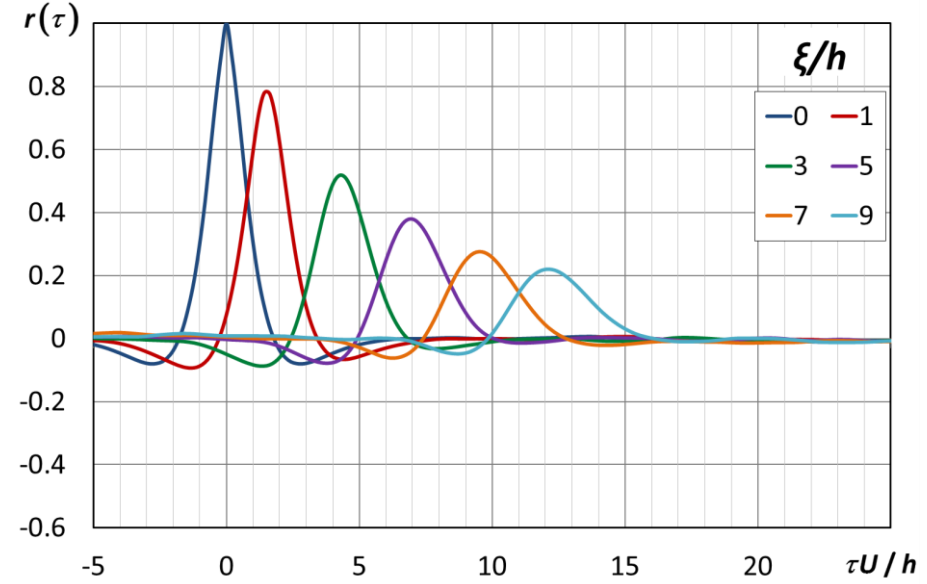
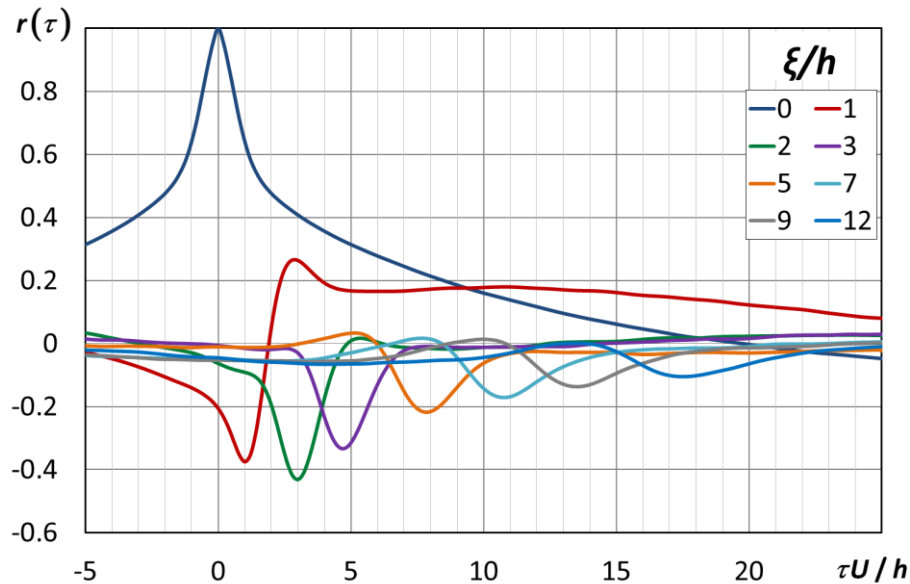
Влияние размера выступающего тела



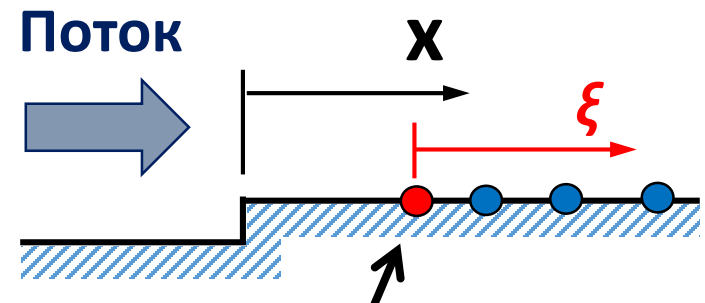
Пустые маркеры –
большая модель ($h = 30$ мм)
Закрашенные маркеры –
маленькая модель ($h = 15$ мм)

Особенности пространственно-временной структуры возмущений поля пристеночных пульсаций давления в турбулентном пограничном слое

Нормированные корреляционные функции



Опорная точка в области отрыва ($x/h = 0.5$)

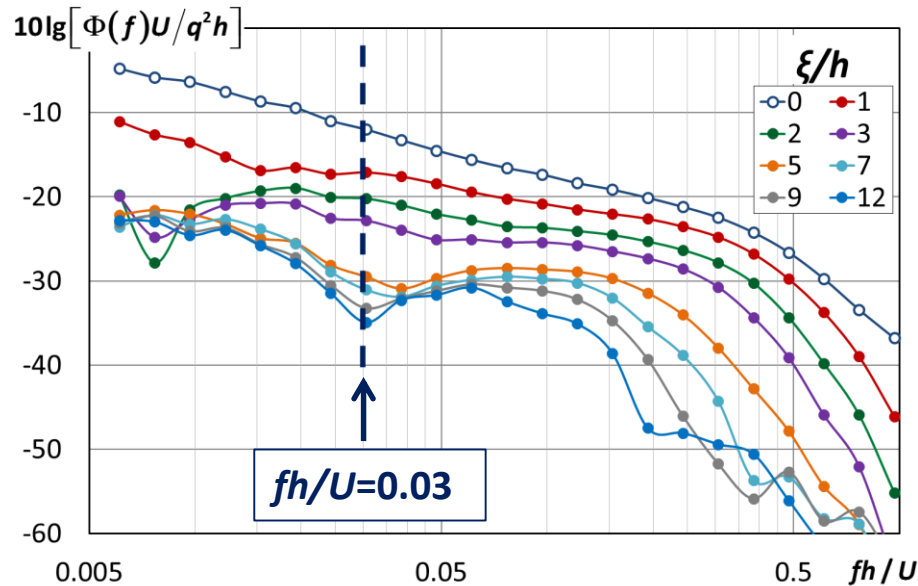


Опорная точка за область присоединения ($x/h = 8.0$)

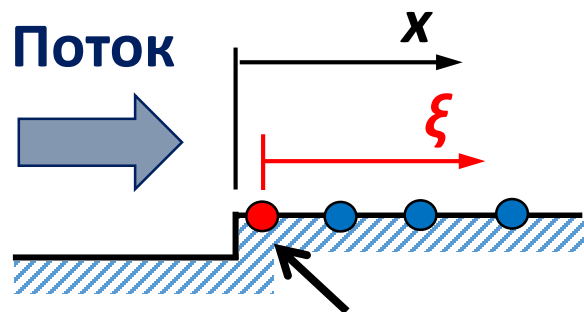
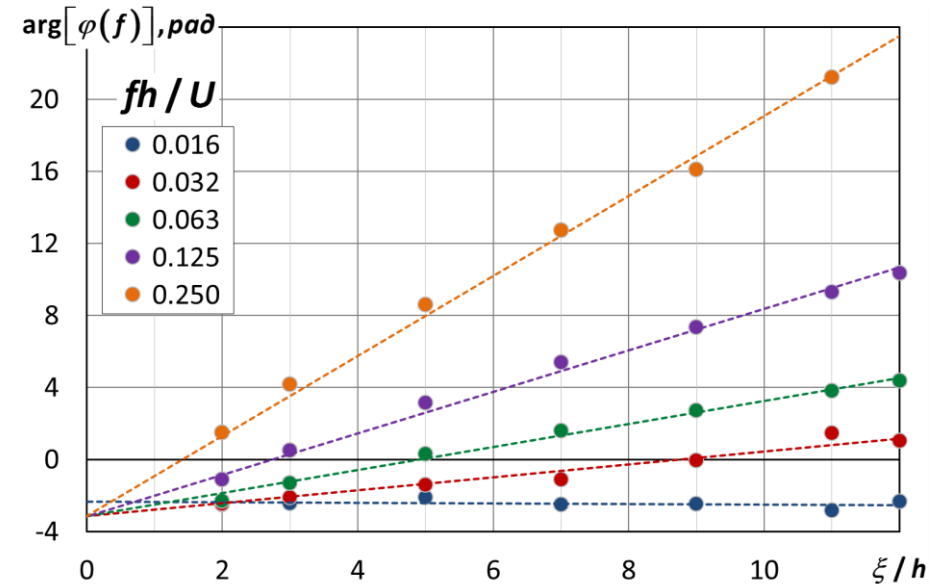
ξ – расстояние между парой датчиков

Распространение возмущений из области отрыва потока

Модуль взаимного спектра



Изменение фазы по пространству



Опорная точка в области отрыва
($x/h = 0.5$)

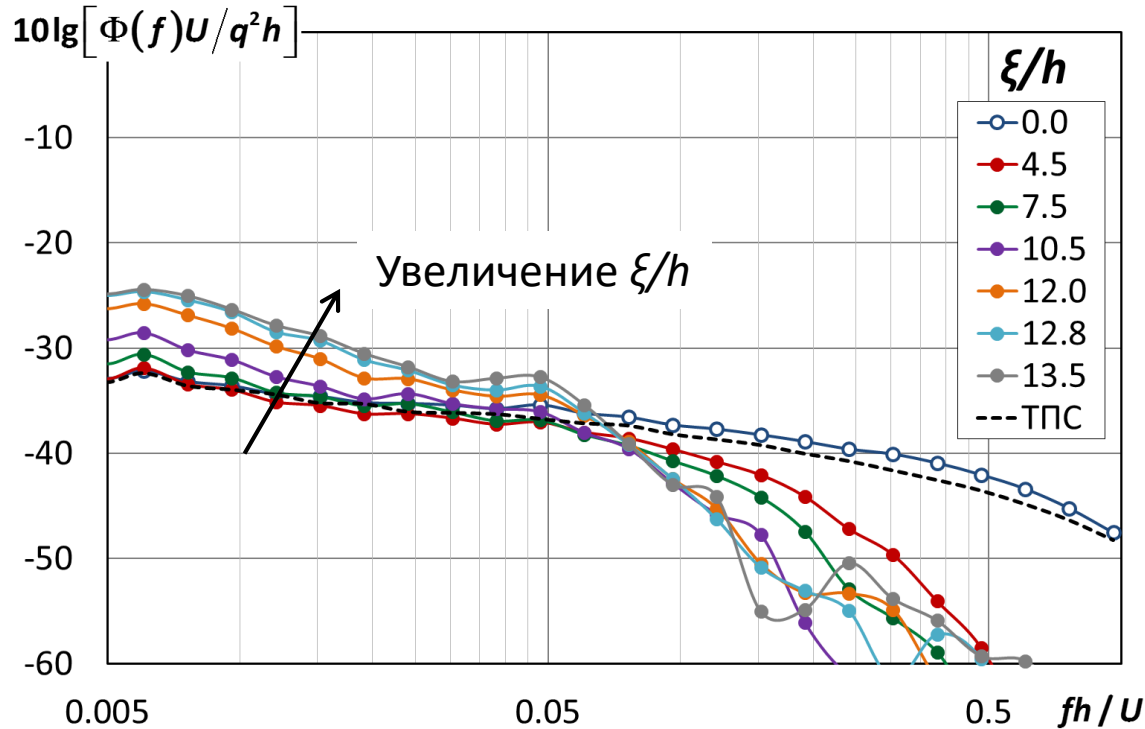
$fh/U > 0.02$ – линейный рост фазы

$fh/U < 0.02$ – практически
постоянная фаза

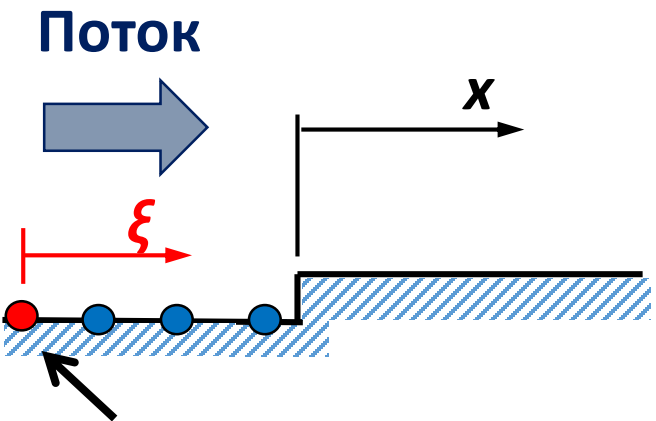
**Различная скорость
распространения возмущений
(в зависимости от числа Струхаля)**

Глобальные корреляции между пристеночными пульсациями давления в окрестности уступа и набегающим ТПС

Модуль взаимного спектра



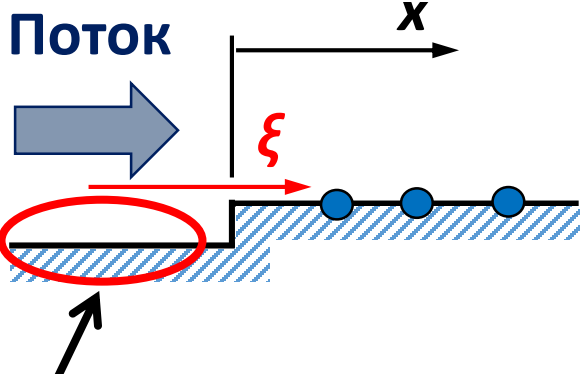
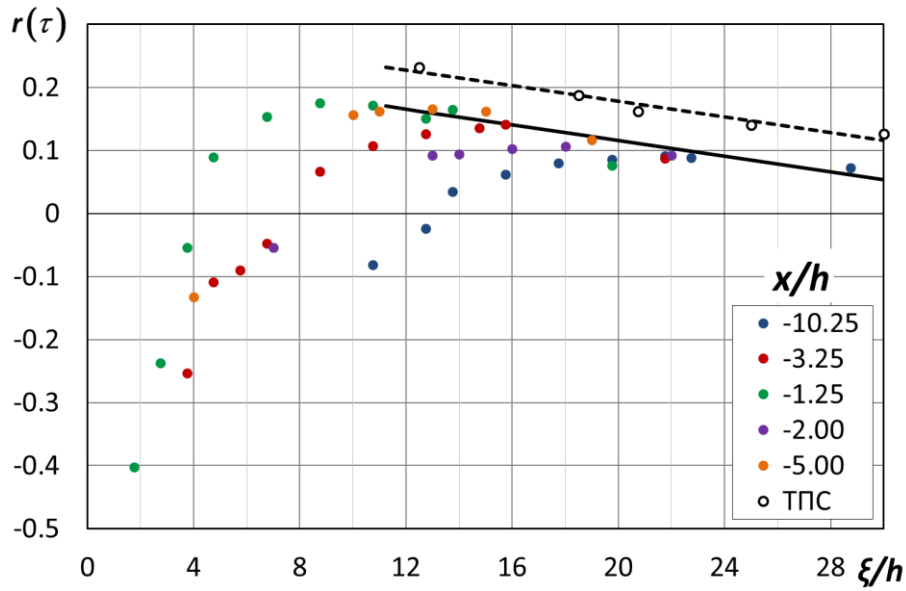
Наличие глобальной корреляции приводит к увеличению взаимной спектральной плотности



Опорная точка в набегающем ТПС ($x/h = -13.8$)

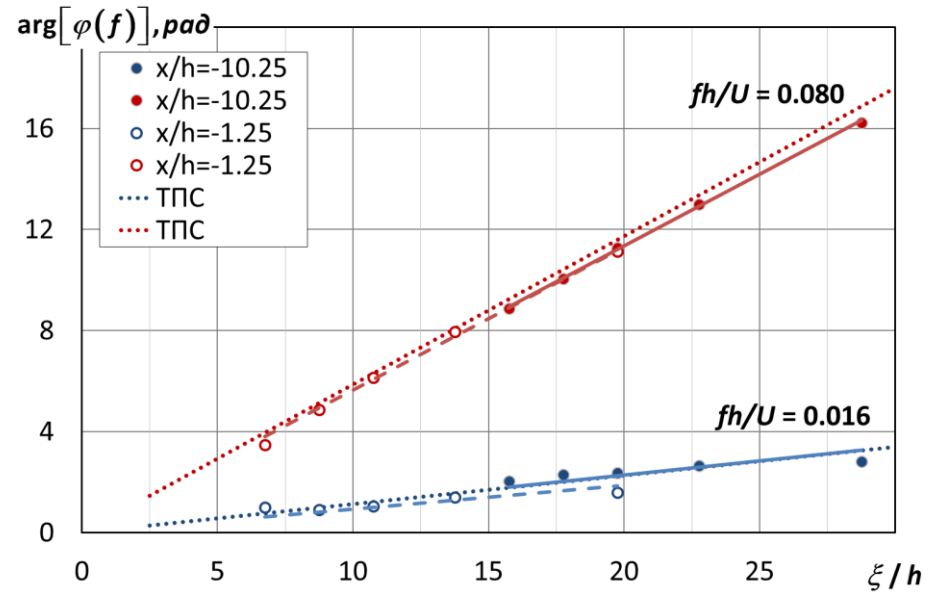
Глобальные корреляции между пристеночными пульсациями давления в окрестности уступа и набегающим ТПС

Зависимость корреляции от расстояния между датчиками



Опорные точки в набегающем ТПС и в области отрыва перед уступом ($x/h = \text{var}$)

Изменение фазы по пространству



На больших расстояниях темпы спада корреляции близки к случаю невозмущённого ТПС

Пространственная зависимость фазы такая же, как в невозмущённом ТПС

Заключение

Проведено обобщение полученных данных, на основании которого предложен метод моделирования спектральной плотности мощности пристеночных пульсаций давления в двумерных отрывных течениях в окрестности уступов. В рамках предложенного подхода учитываются различные источники нестационарных возмущений, а именно колебания зоны отрыва и неустойчивость слоя смешения.

Проведены параметрические исследования влияния трёхмерности осреднённого течения на поле пристеночных пульсаций давления в окрестности и на поверхности выступающих тел в турбулентном пограничном слое. Показано, что пространственный характер обтекания, приводит к количественному (вплоть до 6 дБ), но не к качественному изменению спектров возмущений поля пристеночных пульсаций давления в окрестности геометрических неоднородностей.

Определены основные особенности локальной и глобальной пространственно-временной структуры возмущений нестационарного поля давления на стенке в турбулентном пограничном слое, создаваемых выступающими в поток телами. Показано, что за пределами областей возвратного течения пульсации давления обладают конвективными свойствами. Установлено, что распространение возмущений вниз по потоку из области отрыва сопряжено с появлением фазового сдвига, который не объясняется конвективным переносом вихревых структур.

Спасибо за внимание!