

Седьмая всероссийская конференция

**Вычислительный эксперимент в аэроакустике**

17-22 сентября 2018 года г. Светлогорск Калининградская область

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНОГО  
АКУСТИЧЕСКОГО ИМПЕДАНСА ОТВЕРСТИЙ**

А.И. Быков<sup>1</sup>, А.И. Комкин<sup>1</sup>, М.А. Миронов<sup>1,2</sup>

*<sup>1</sup>Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва*

*<sup>2</sup>АКИН имени академика Н.Н. Андреева РАН, Москва*

# Линейный акустический импеданс отверстия в перегородке

Безразмерный (приведенный к  $\rho c$ ) импеданс отверстия

$$\bar{Z} = \bar{R}_l + ikl_e,$$

где  $R_l = 2k\delta_v l/d_0$  – линейное безразмерное сопротивление в отверстии;

$k = \omega/c$  – волновое число;

$\omega$  – угловая частота;

$\delta_v = (2\nu/\omega)^{1/2}$  – глубина погранслоя;

$\nu$  – кинематическая вязкость воздуха;

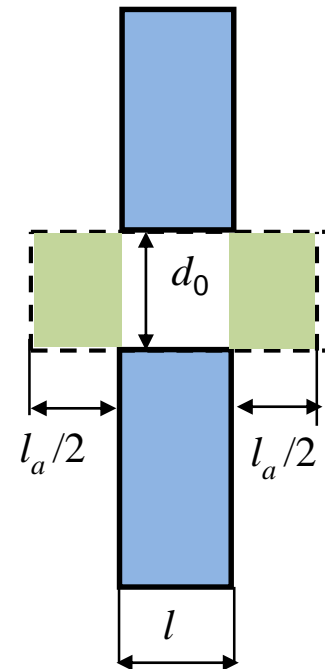
$l$  – действительная длина отверстия;

$d_0$  – диаметр отверстия,  $l_e = l + l_a$ ;

$l_e$  – эффективная длина отверстия,  $l_e = l + l_a$ ;

$l_a$  – присоединенная длина отверстия.

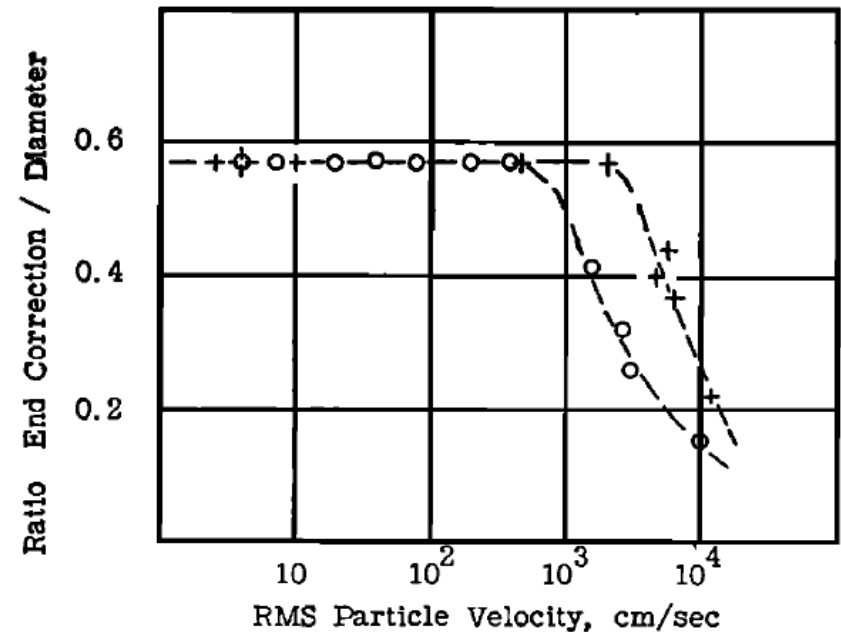
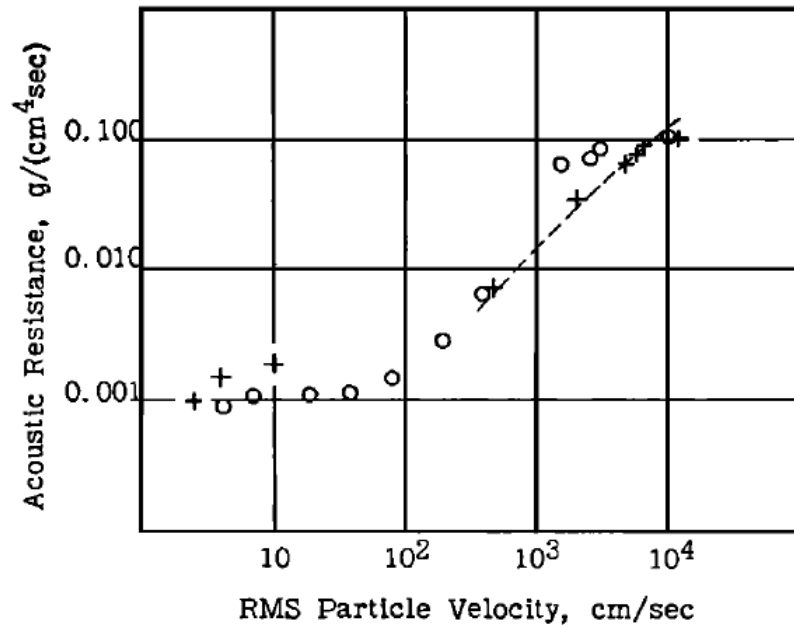
$$l_a = 0.81(1 - 1.34g)d_0.$$



Импеданс отверстия не зависят от уровня звукового давления в импедансной трубе.

# Импеданс горла резонатора на нелинейных режимах (высоких уровнях звукового давления)

(Bies D., Wilson O. // J. Acoust. Soc. Am. 1957. V. 29, № 6. – P. 711–714.)



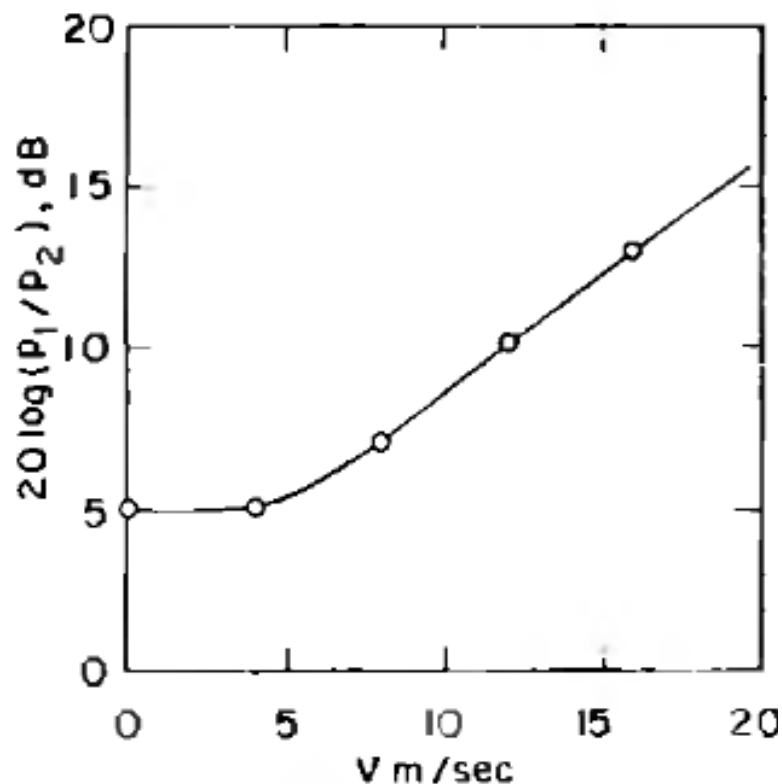
Резонатор расположен на торцевой ( $\circ$ ) и боковой ( $+$ ) стенках канала

Полагают, что нелинейные свойства отверстия при высоких уровнях звукового давления (точнее колебательной скорости) связаны с отрывом потока (образование струи) при прохождении звука через отверстие.

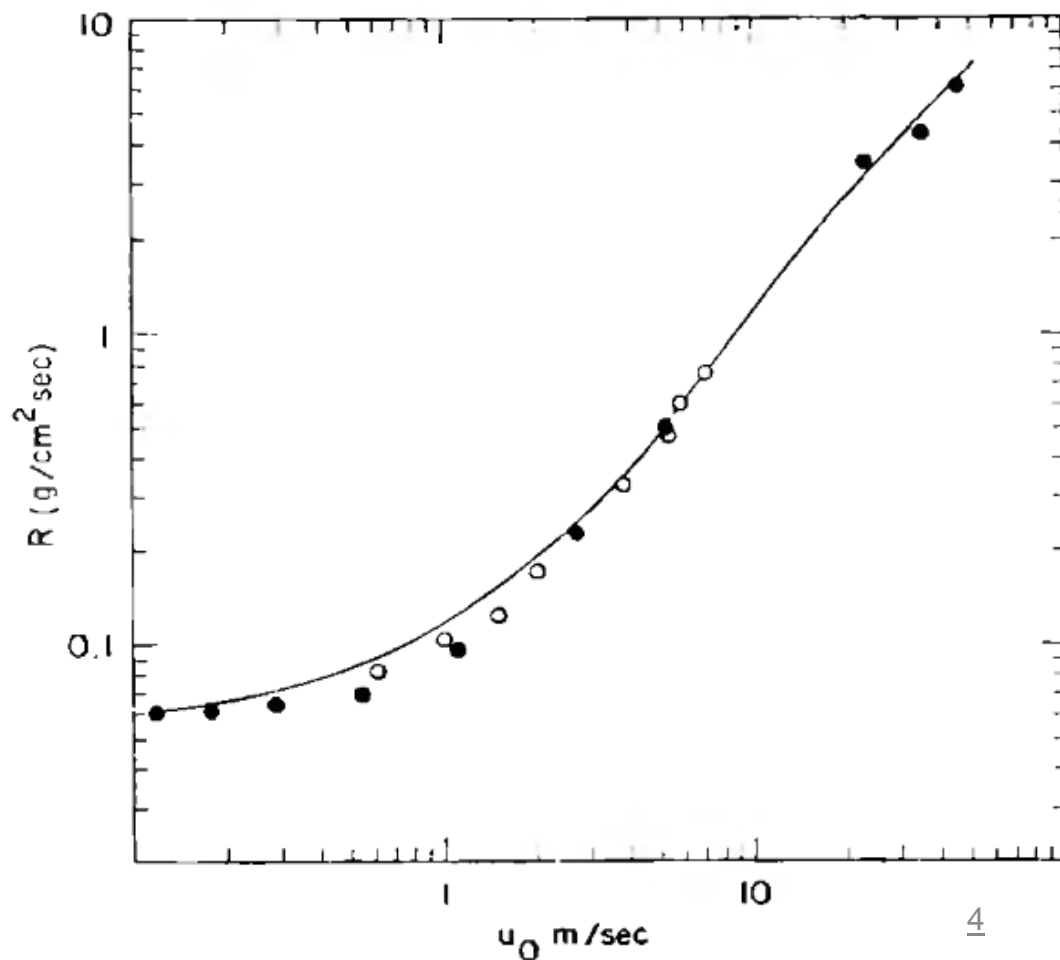
# Гипотеза о справедливости на нелинейных режимах закона Бернулли

(Ingard U., Ising H. // J. Acoust. Soc. Am. 1967. V. 42, № 1. P. 6–17.)

**Постоянный воздушный поток**



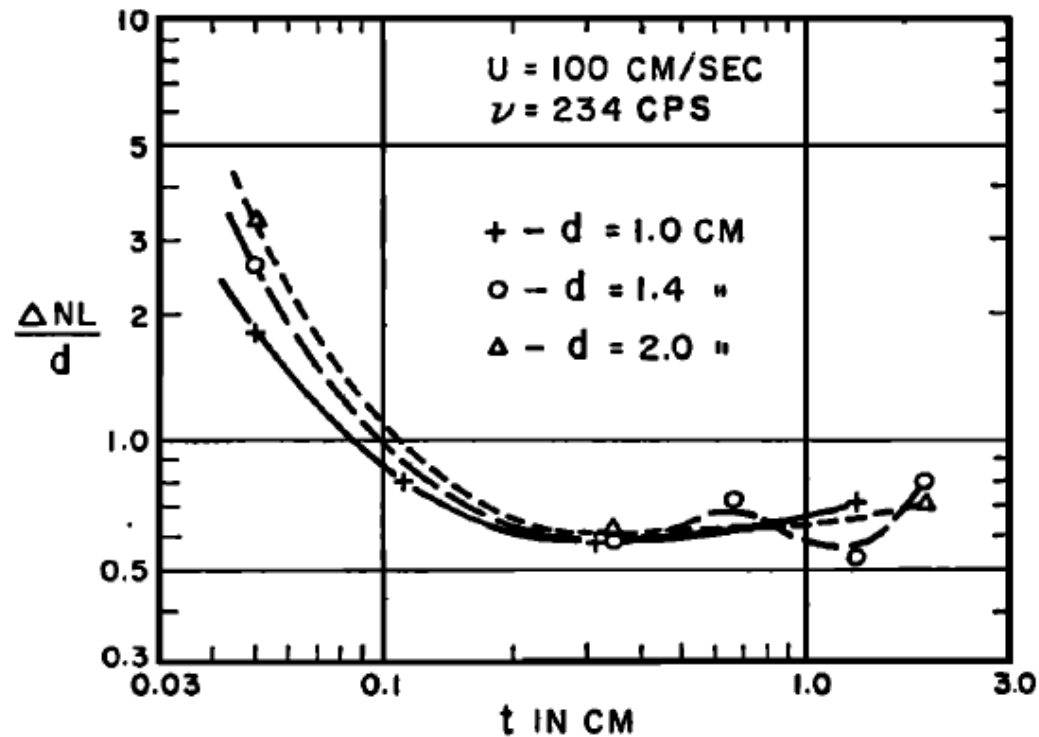
**Звуковая волна**



# Постановка задачи

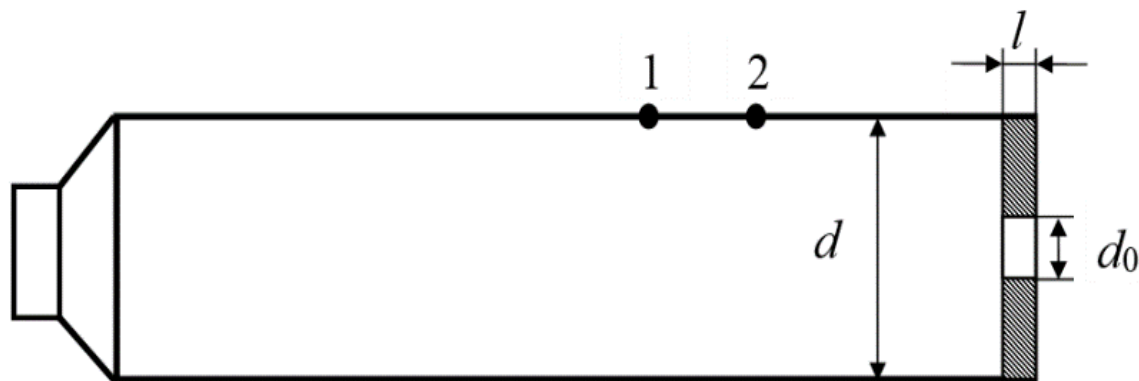
До настоящего времени не исследовано влияние диаметра отверстия на его импеданс в нелинейном режиме, не смотря на большое количество публикаций, посвященных нелинейному импедансу отверстий. Как это не удивительно, но единственной статьей, которая касалась этого вопроса, остается работа У. Ингарда:

(Ingard U. // J. Acoust. Soc. Am. 1953. V. 25, № 6. P. 1037–1061.)



Целью данной работы является устранение этого пробела и установлении закономерности изменения нелинейного импеданса отверстия от его диаметра.

## Определение зависимости импеданса отверстий от их диаметра в большой импедансной трубе



Перегородки толщиной  $l=2$  мм, диаметр отверстий от 4 до 20 мм.

Определялся коэффициент отражения от перегородки  $R$ , а затем безразмерный импеданс отверстия перегородки

$$\bar{Z} = g^2(1 + R)/(1 - R), \quad \text{где } g = d_0/d$$

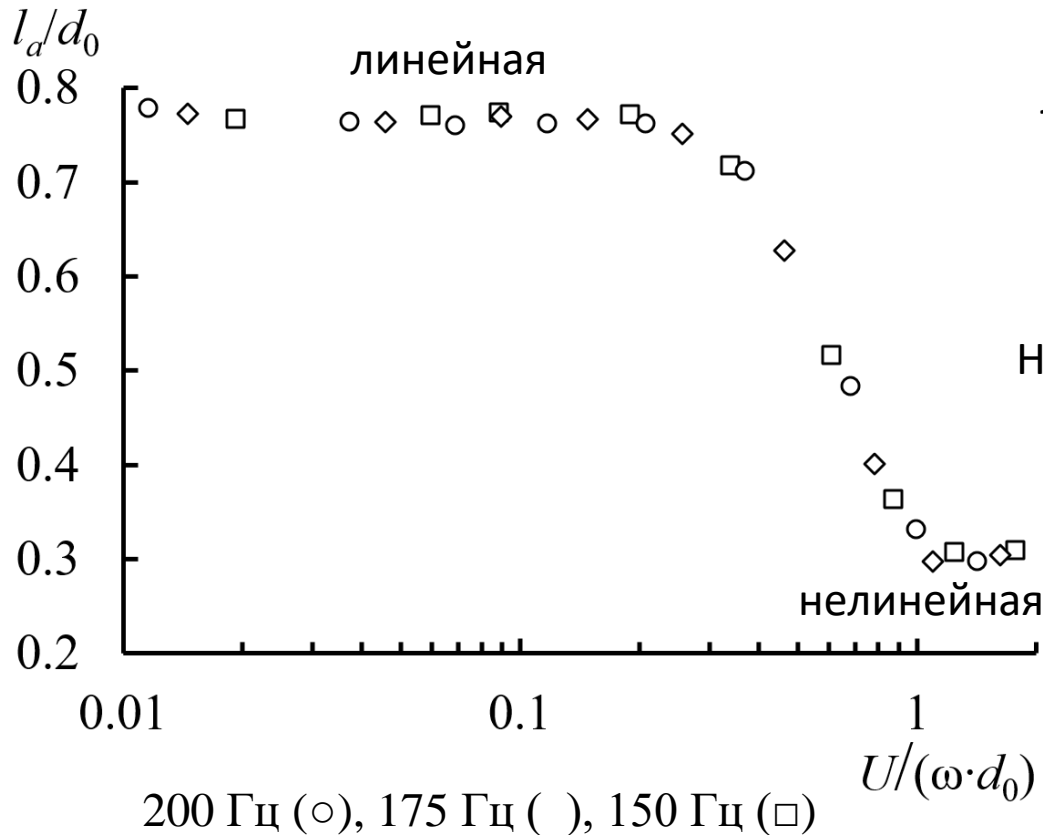
### 1-й этап

(Комкин А.И., Быков А.И., Миронов М.А. // Акуст. журн. 2018. Т. 64. №.3. С. 296–301.  
Комкин А.И., Быков А.И., Миронов М.А. // Акуст. журн. 2018. Т. 64. №.5. С. 562–565.)

Источник звука - динамик SVEN HT-500 мощностью 120 Вт  
создавал звуковое давление в импедансной трубе до 135 дБ.

# Исследование мнимой части импеданса отверстия в терминах присоединенной длины отверстия

$$\text{Im } \bar{Z} = kl_e \rightarrow l_a = \text{Im } \bar{Z} / k - l$$



Линейная присоединенная длина

$$l_{al} = 0.81(1 - 1.34g)d_0.$$

Нелинейная присоединенная длина

$$l_{nl} = l_{al} - \Delta l_{nl}$$

С параметром  $U/(\omega d_0)$  получаем частотно независимые оценки

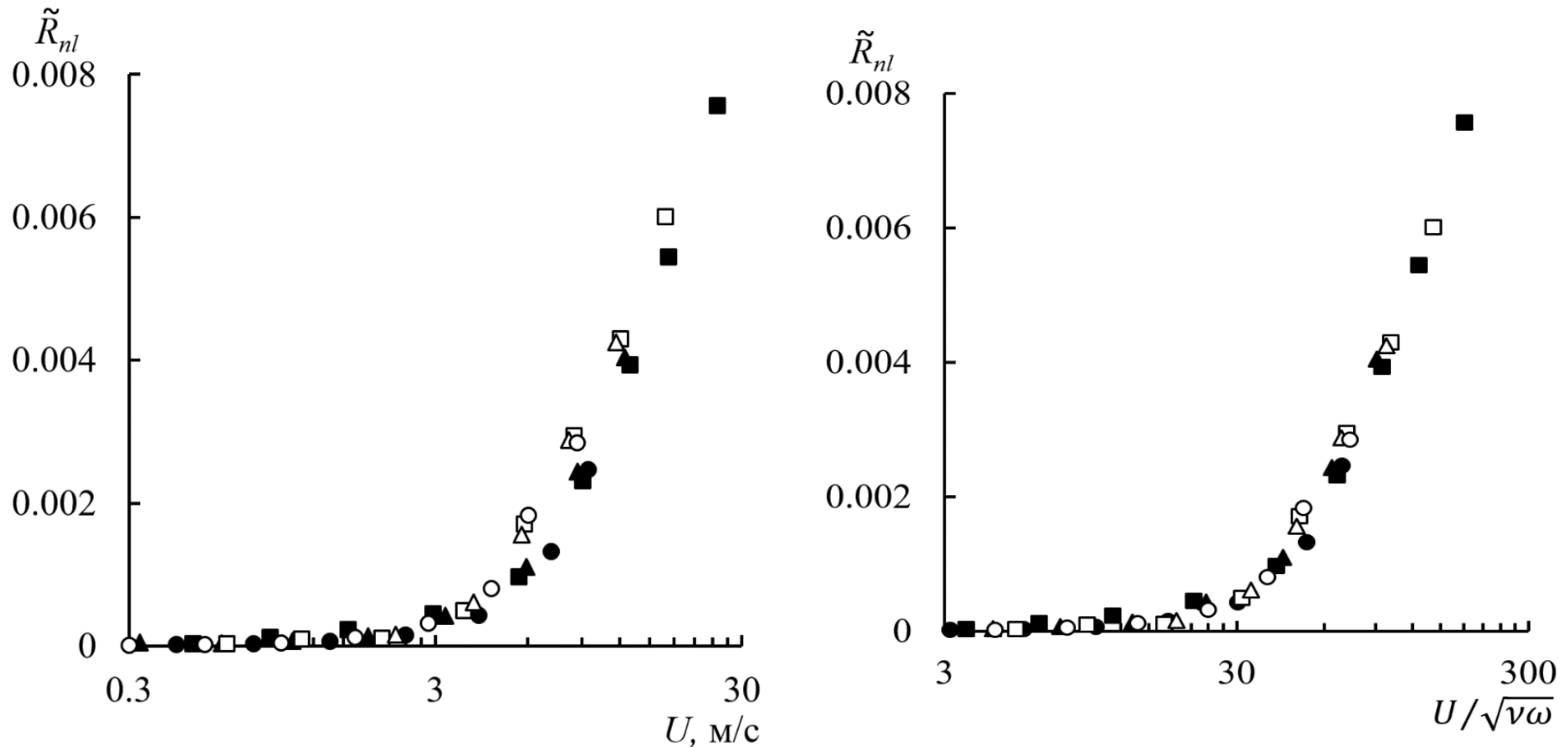
**Установлено**, что на нелинейном режиме присоединенная длина выходит на новый уровень, зависящий от диаметра отверстия.

Этот уровень может отличаться от линейной более чем в два раза!

Уменьшение присоединенной длины происходит по обеим сторонам отверстия!  $\underline{z}$

# Приведенное нелинейное сопротивление отверстия

$$\tilde{R}_{nl} = \bar{R}_{nl} l_0 / d_0, \quad \bar{R}_{nl} = \bar{R} - \bar{R}_l, \quad l_0 = 10^{-3} \text{ м} - \text{единичная длина,}$$

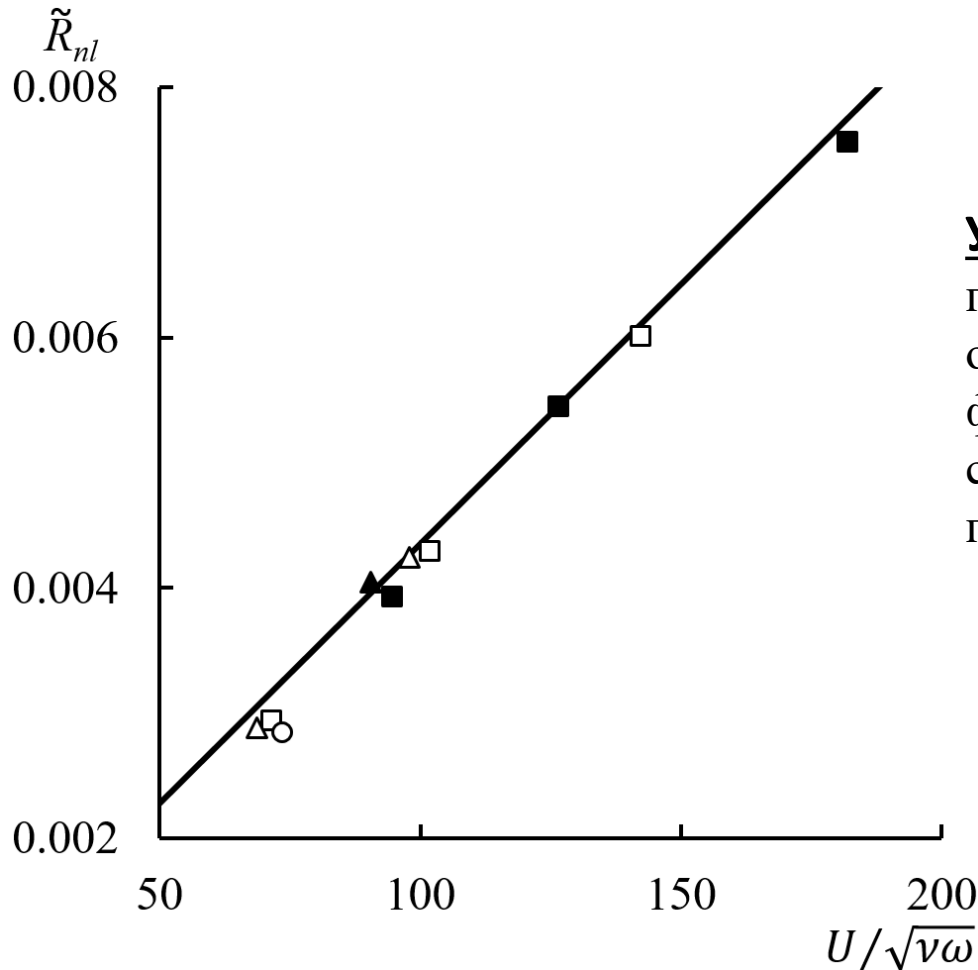


$d_0 = 4 \text{ мм}$  ( $\square$ ),  $d_0 = 7 \text{ мм}$  ( $\Delta$ ),  $d_0 = 10 \text{ мм}$  ( $\circ$ ) и  $f_0 = 150 \text{ Гц}$ ;  $d_0 = 4 \text{ мм}$  ( $\blacksquare$ ),  $d_0 = 7 \text{ мм}$  ( $\blacktriangle$ ),  $d_0 = 10 \text{ мм}$  ( $\bullet$ ) и  $f_0 = 200 \text{ Гц}$ .

Частотно независимым оценки обеспечивает параметр  $U/\sqrt{\nu\omega}$



# Линейная аппроксимация приведенного нелинейного сопротивления при высоких уровнях колебательной скорости



$$\tilde{R}_{nl} = (8.3\bar{U} + 20)10^{-5}.$$

$$\bar{U} = U/\sqrt{\nu\omega}$$

**Установлено**, что хотя зависимость приведенного нелинейного сопротивления от скорости аппроксимируется линейной функцией. Однако, само безразмерное сопротивление оказывается пропорциональным его диаметру:

$$\bar{R}_{nl} = \frac{d_0}{l_0} \tilde{R}_{nl}.$$

Это не согласуется с законом Бернулли!

$d_0 = 4$  мм ( $\square$ ),  $d_0 = 7$  мм ( $\Delta$ ),  $d_0 = 10$  мм ( $\circ$ ) и  $f_0 = 150$  Гц;  
 $d_0 = 4$  мм ( $\blacksquare$ ),  $d_0 = 7$  мм ( $\blacktriangle$ ),  $d_0 = 10$  мм ( $\bullet$ ) и  $f_0 = 200$  Гц.

# Определение зависимости импеданса отверстий от их диаметра в большой импедансной трубе

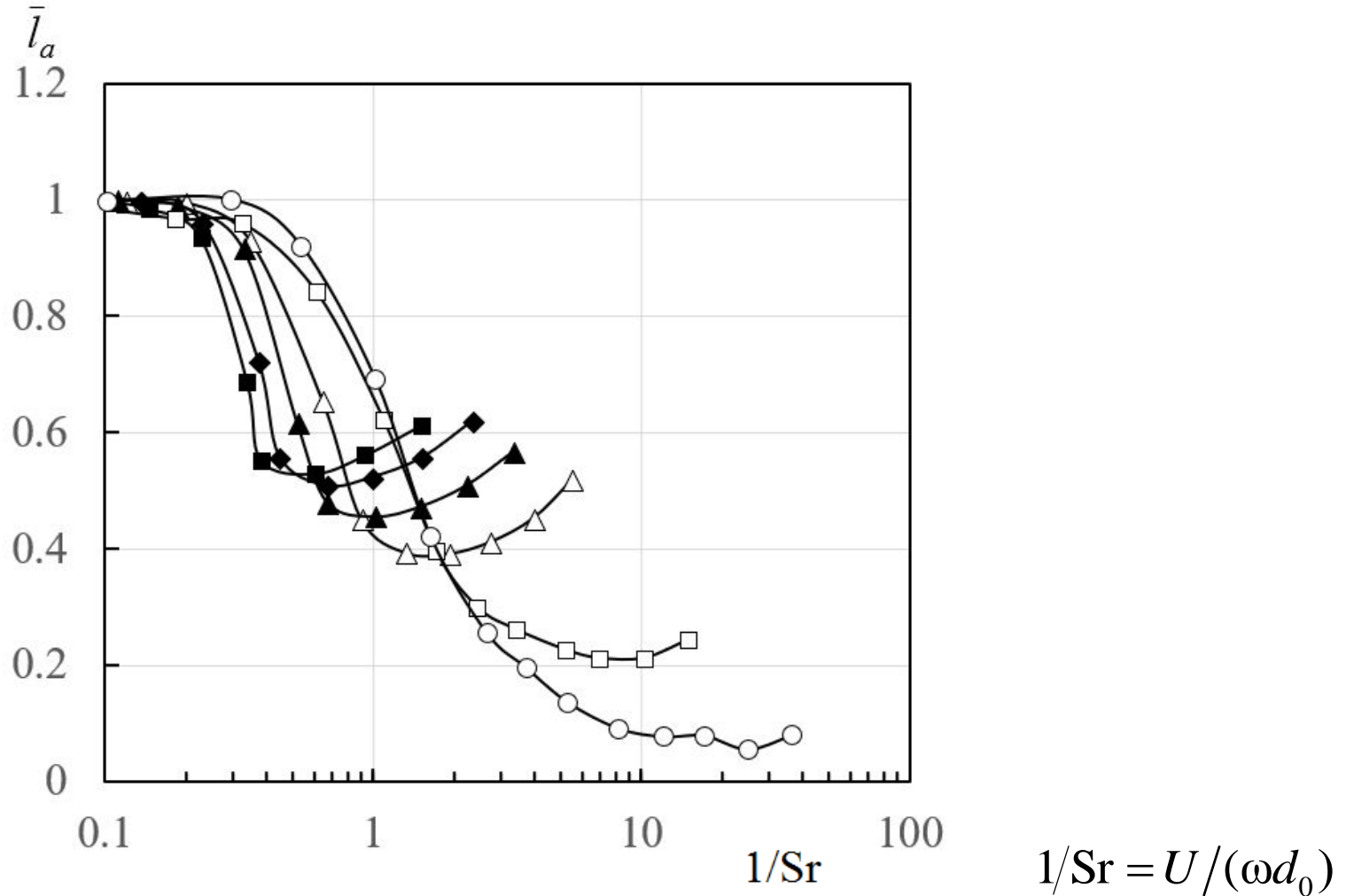
## 2-й этап

Источник звука - динамик Веута 12M1100 диаметром 300 мм мощностью 450 Вт, что дало возможность создавать звуковые давления в трубе до 155 дБ.



Большой диаметр импедансной трубы ( 99 мм) позволяет исследовать перегородки с большим диапазоном диаметров отверстий.

# Зависимость присоединенной длины отверстий от безразмерной скорости



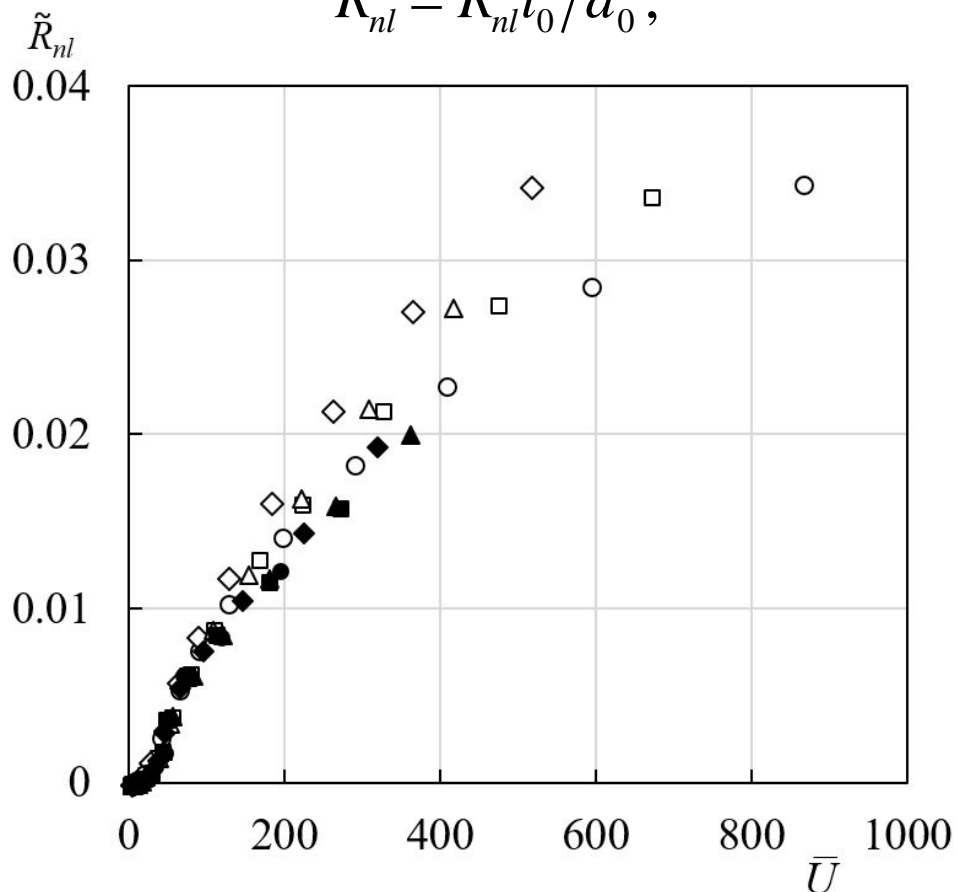
—○—, 3 мм; —□—, 4 мм; —△—, 7 мм; —▲—, 10 мм; —◆—, 12 мм; —■—, 15 мм.

Чем больше диаметр отверстий – тем меньший скачок на новый пороговый уровень

# Зависимость сопротивления отверстий от безразмерной скорости

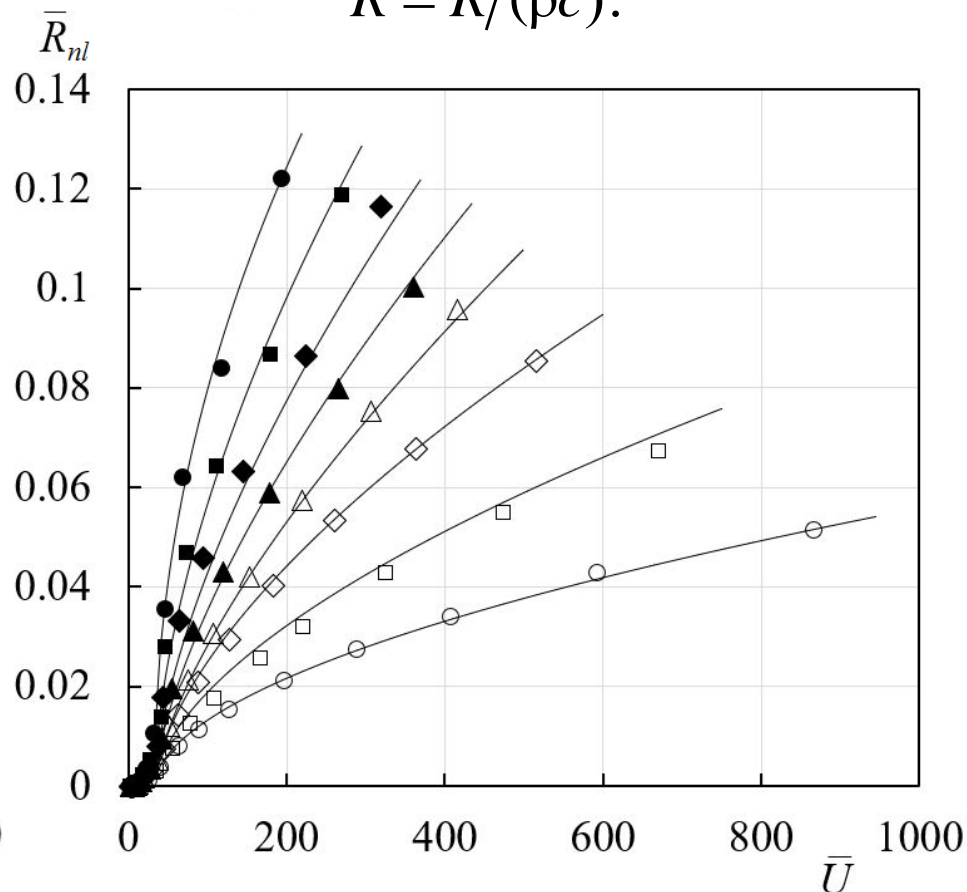
Приведенное сопротивление

$$\tilde{R}_{nl} = \bar{R}_{nl} l_0 / d_0,$$



Безразмерное сопротивление

$$\bar{R} = R / (\rho c).$$



◇, 5 мм; △, 7 мм; ▲, 10 мм; ◆, 12 мм; ■, 15 мм; ●, 20 мм; —, аппроксимация

Безразмерное сопротивление – нелинейная функция безразмерной скорости

# Перфорированные перегородки

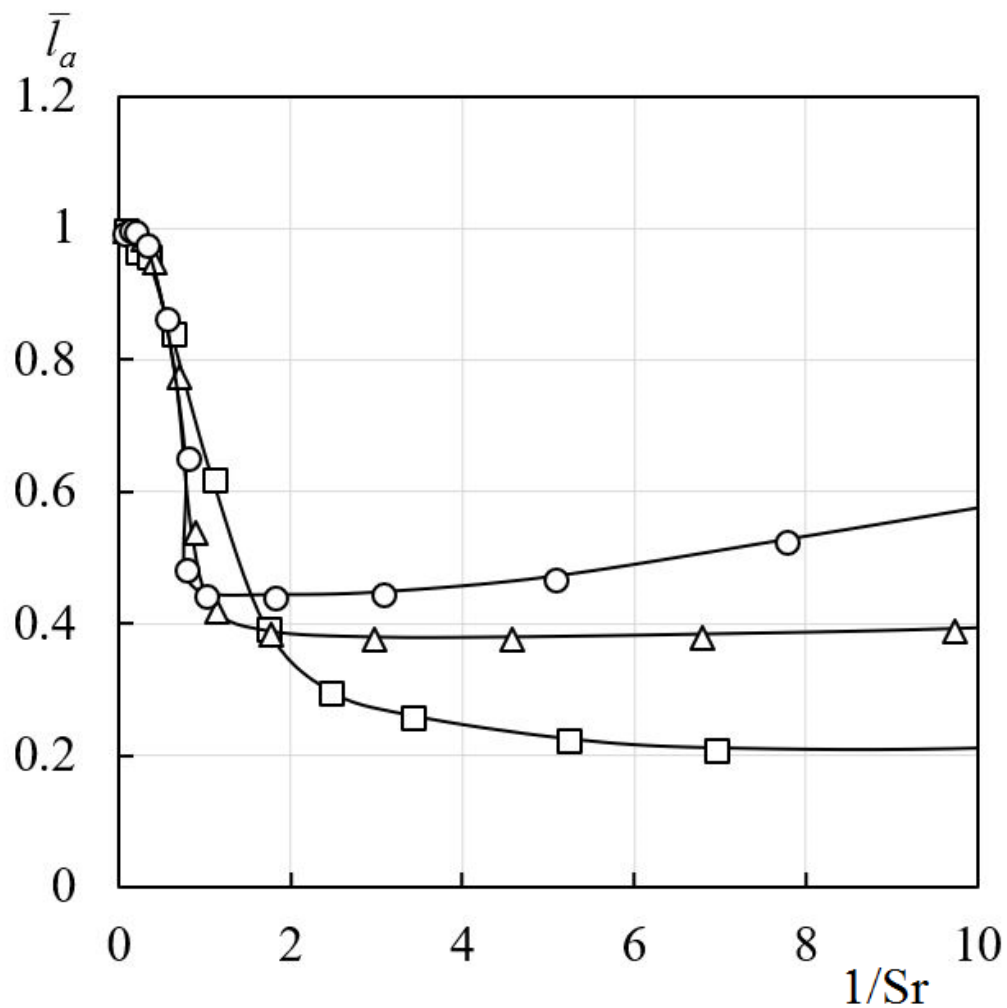
Пористость

$\sigma = 0.16\%$

$\sigma = 0.82\%$

$\sigma = 1.47\%$

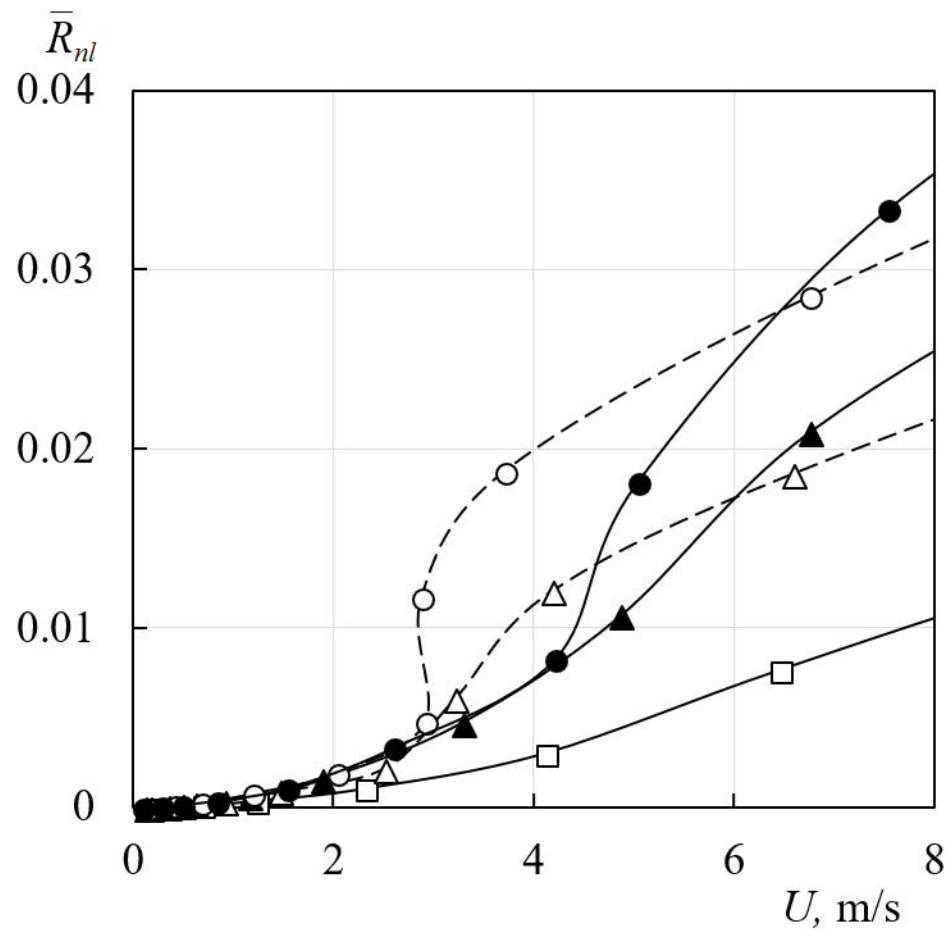
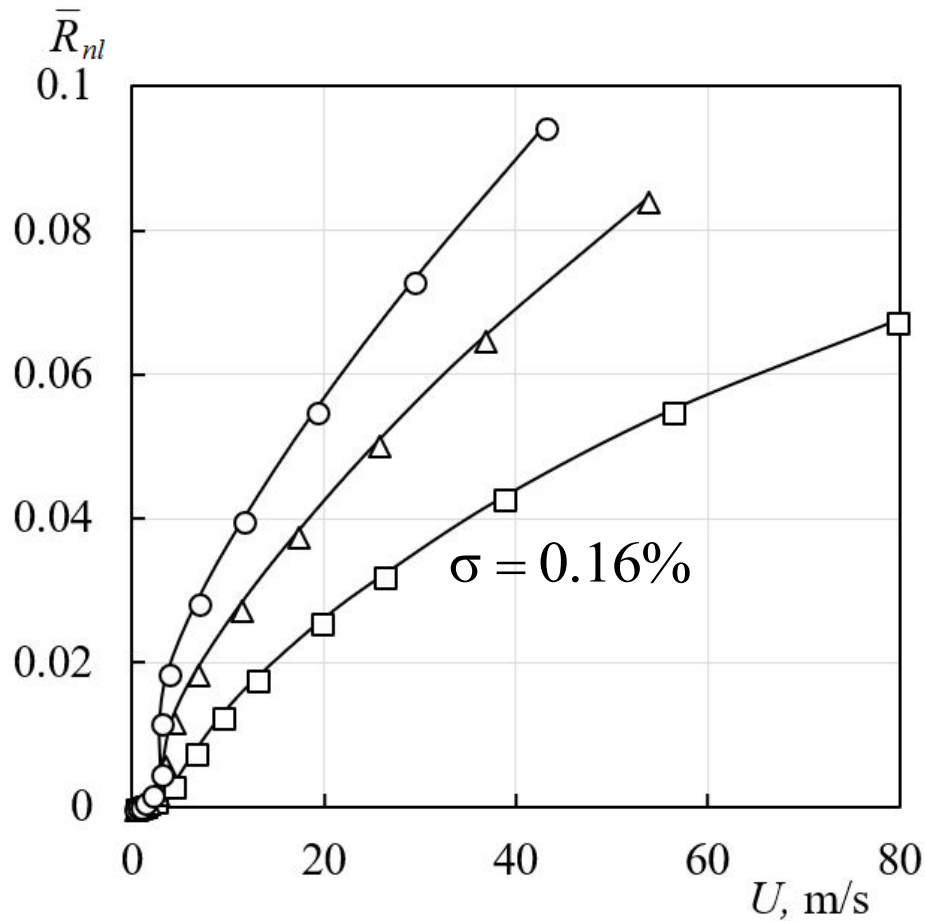
Присоединенная длина отверстий



Перегородки с одним ( $-\square-$ ), пятью ( $-\Delta-$ ) и девятью ( $-\circ-$ ) отверстиями диаметром 4 мм

# Перфорированные перегородки

Безразмерное сопротивление

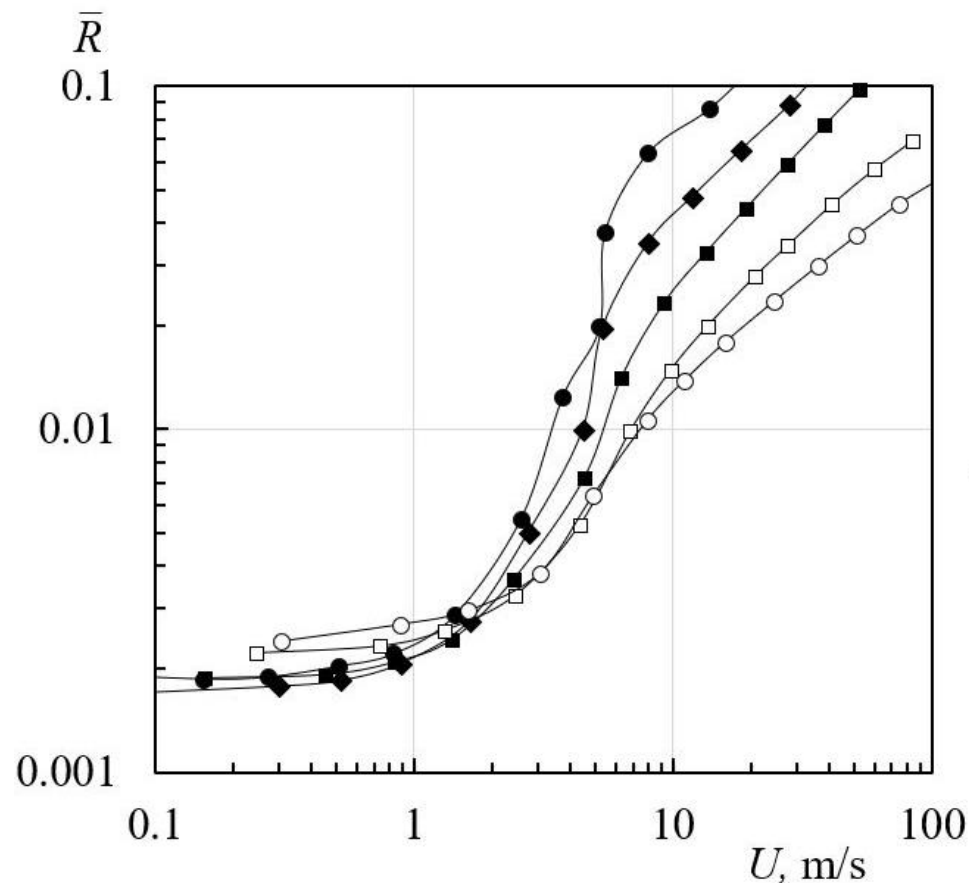


—□—, 1 отв. 4 мм; —Δ—, 5 отв. 4 мм; —○—, 9 отв. 4 мм; —▲—, 1 отв. 9 мм; и —●—, 1 отв. 12 мм.

Перегородки с одинаковыми пористостями: 5 отв. 4 мм и 1 отв. 9 мм;  
9 отв. 4 мм и 1 отв. 12 мм.

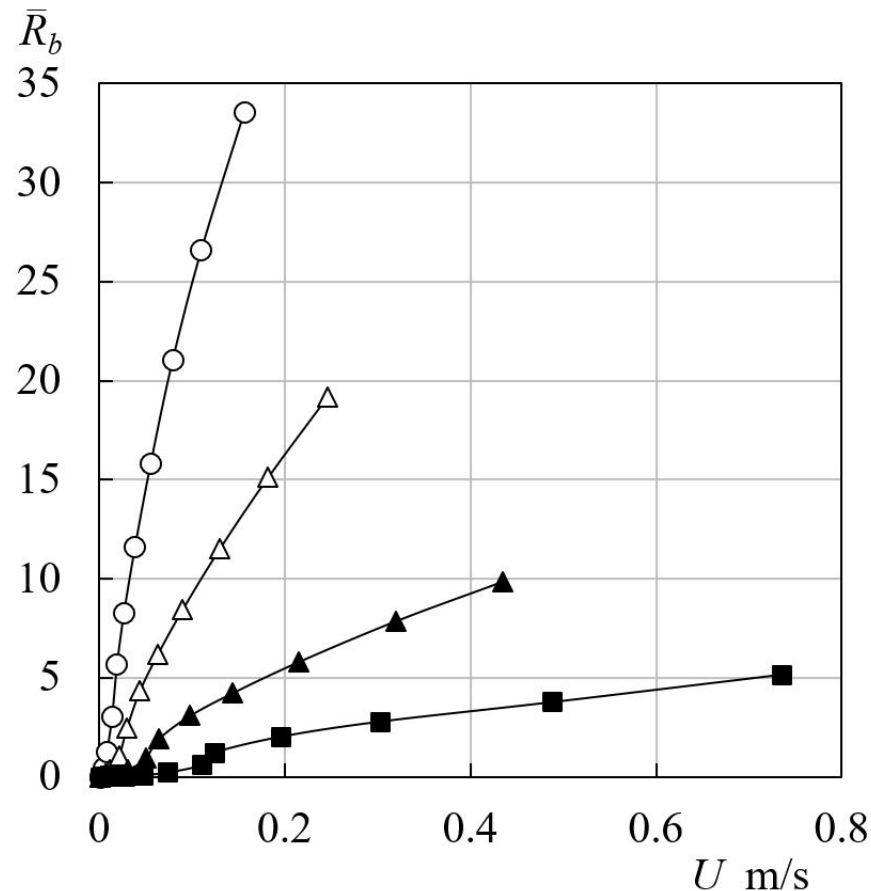
# Анализ полученных результатов

## Сопротивление отверстий



Диаметры отверстий:  $-\circ-$ , 3 мм;  $-\square-$ , 4 мм;  
 $-\blacksquare-$ , 7 мм;  $-\blacklozenge-$ , 12 мм;  $-\bullet-$ , 20 мм.

## Сопротивление перегородки

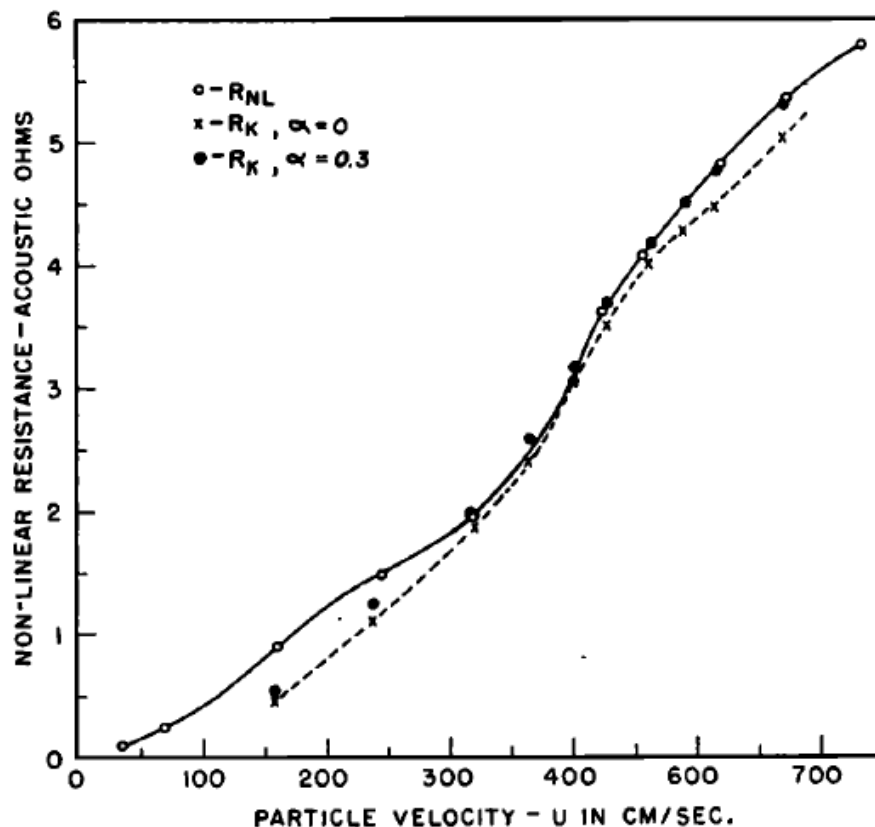


Диаметры отверстий:  $-\circ-$ , 5 мм;  
 $-\triangle-$ , 7 мм;  $-\blacktriangle-$ , 10 мм;  $-\blacksquare-$ , 15 мм.

# Сопротивление отверстия и скорость струи в отверстии

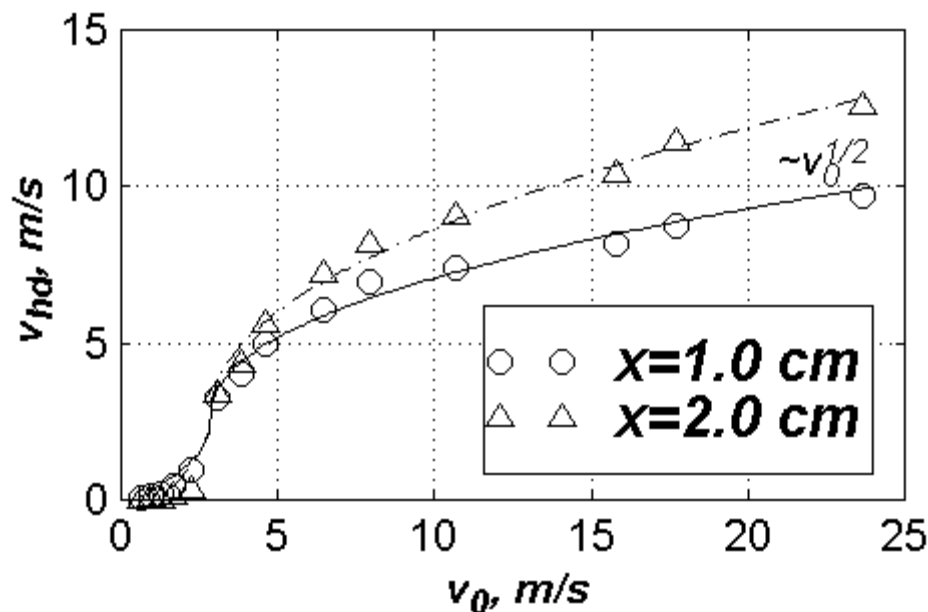
Ingard, U., Labate S. // J. Acoust. Soc. Am.  
1950. V. 22, № 2. P 211–218.

Связь между колебательной скоростью  
в отверстии и скоростью струи



— $\circ$ —, измерение; — $\times$ —, вклад струи (расчет);  
— $\bullet$ —, вклад струи и вихрей. (расчет)

(Grushin A.E., Dragan S.P., Lebedeva I.V.//  
XI Session of the Russian Acoustical Society.  
Moscow, November 19-23, 2001)





# Дальнейшие развитие работы

Цель: определить зависимость скорости струи в отверстии от его диаметра.

## Три направления

### 1. Экспериментальное исследование характера движения среды в отверстии

(Buick J.M. et al // J. Acoust. Soc. Am., Vol. 129, No. 3, 2011. P.1261-1272.)

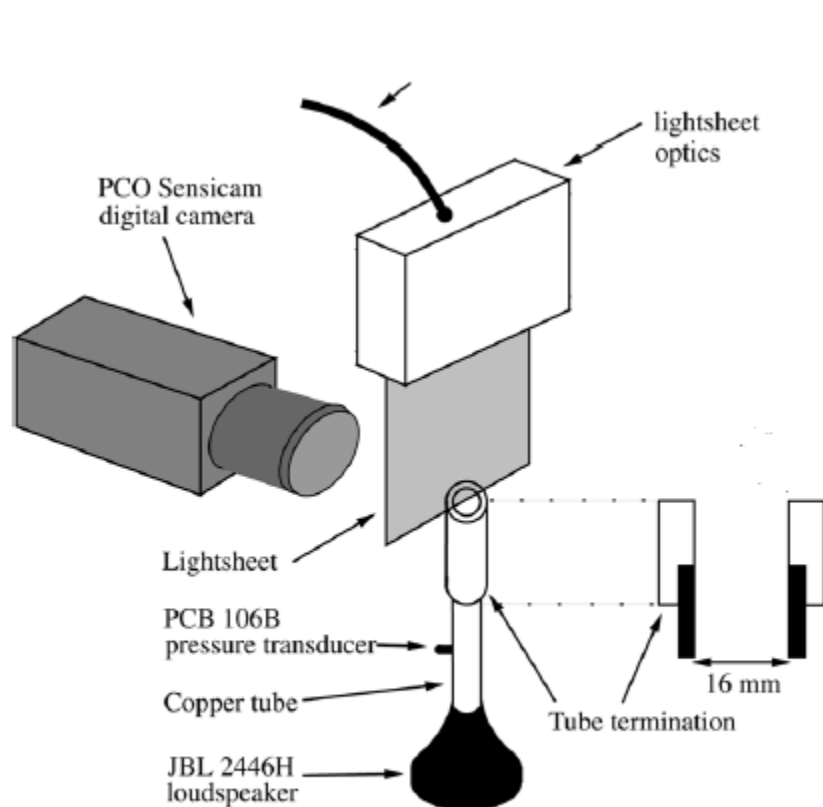
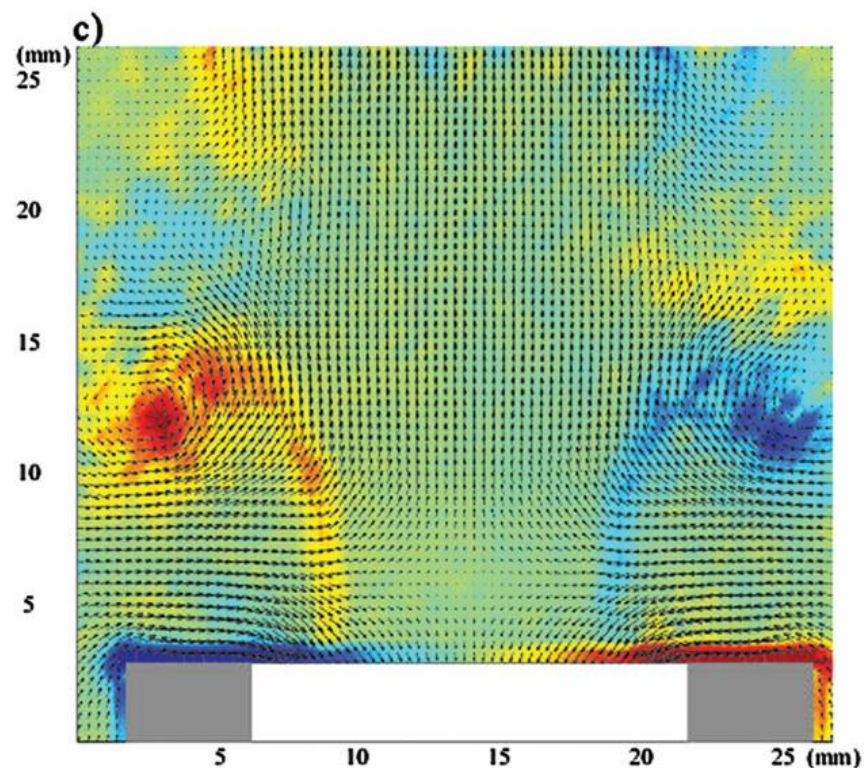


FIG. 2. The experimental configuration.



Velocity and vorticity fields at a SPL of 170 dB

# Дальнейшие развитие работы

## 2. Проведение численных расчетов

(Scarpato A.. Linear and nonlinear analysis of the acoustic response of perforated plates traversed by a bias flow. Engineering Sciences [physics]. Ecole Centrale Paris, 2014.)

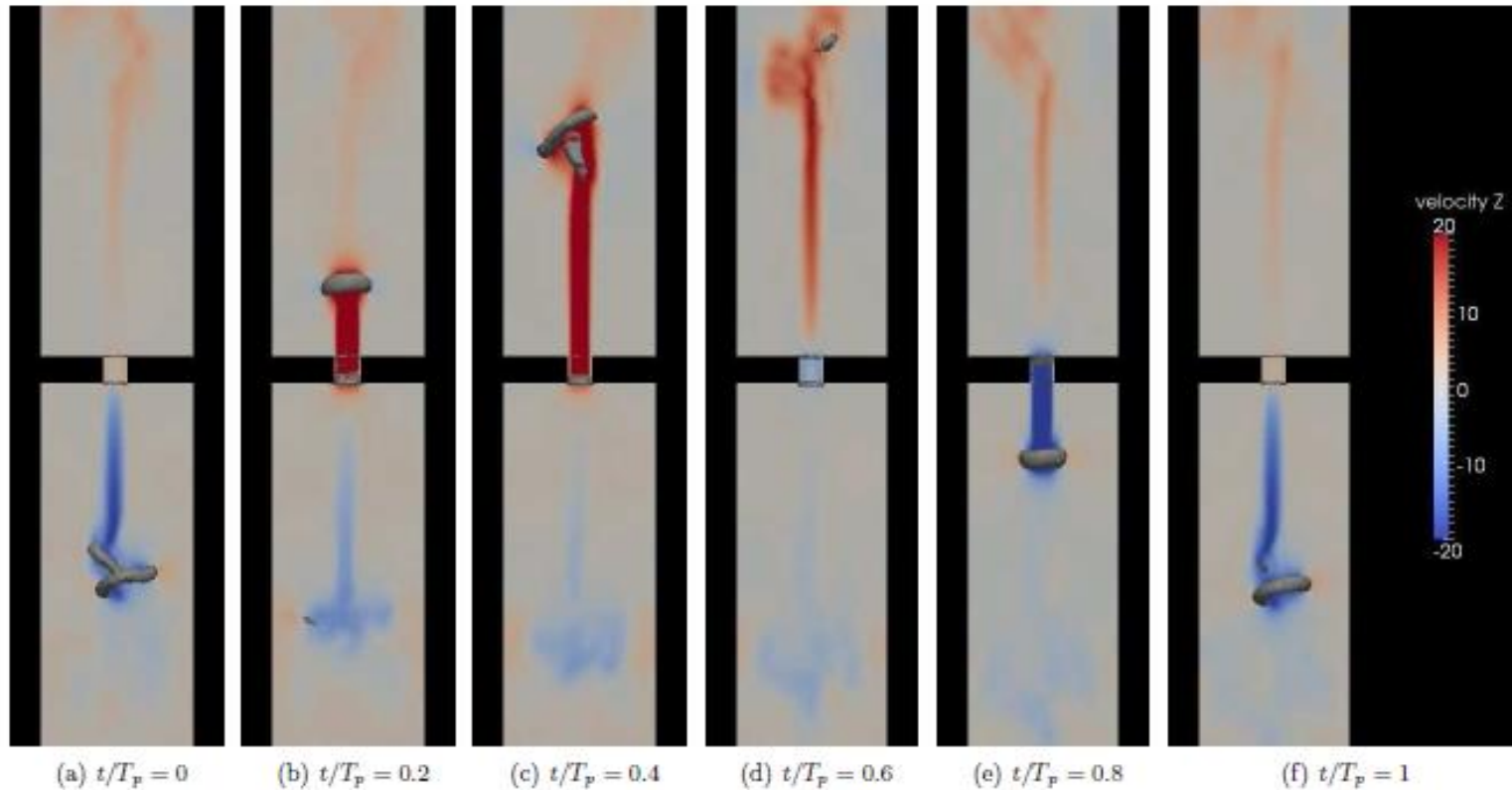


Figure 5.5: Axial slice extracted from simulations, presenting the unsteady flow in the vicinity of the perforation, traversed by a mean bias flow  $\bar{u}_0 = 3.40 \text{ ms}^{-1}$  (directed from the bottom to the top) and subjected to acoustic waves at the forcing frequency  $f = 400 \text{ Hz}$  and at a high SPL = 140 dB.

## 3. Проведение аналитических расчетов ?

# Выводы

1. Проведенные экспериментальные исследования позволили определить особенности изменения нелинейного импеданса отверстия в зависимости от его диаметра;
2. Полученный при этом результат, что нелинейное сопротивление отверстия в противоположность линейному сопротивлению увеличивается с диаметром отверстия не имеет ясной физической интерпретации;
3. Необходимы дальнейшие исследования, чтобы объяснить полученные эффекты в поведении импеданса отверстий на нелинейном режиме.

Приглашаются все желающие!