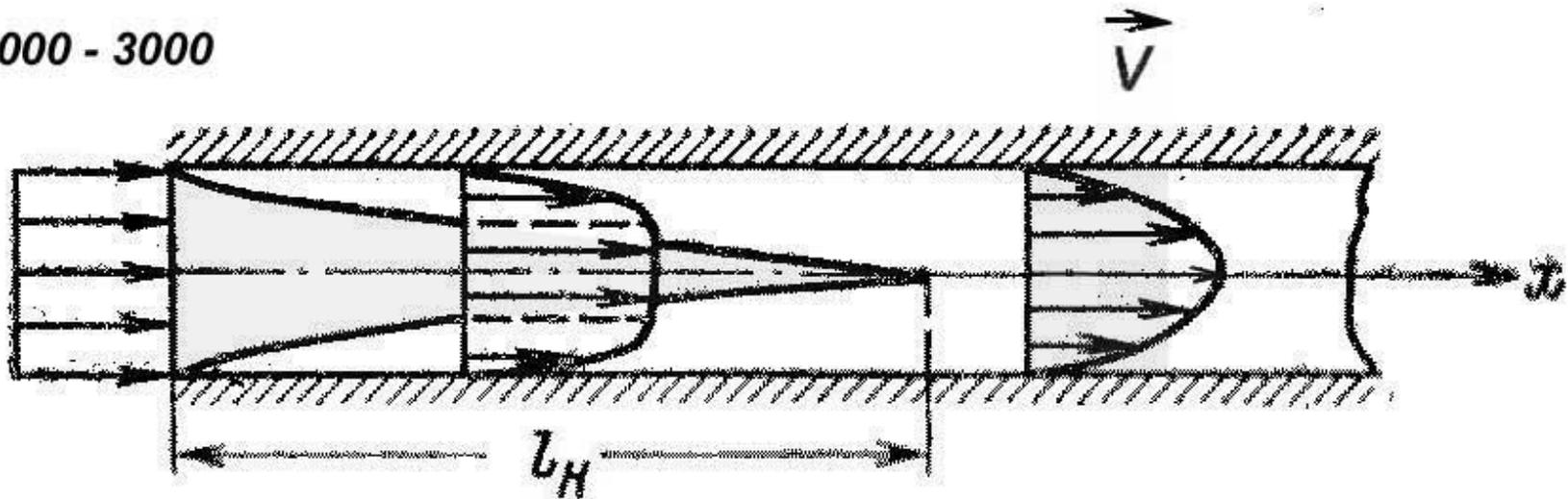


# Установившееся течение газа через длинный трубопровод

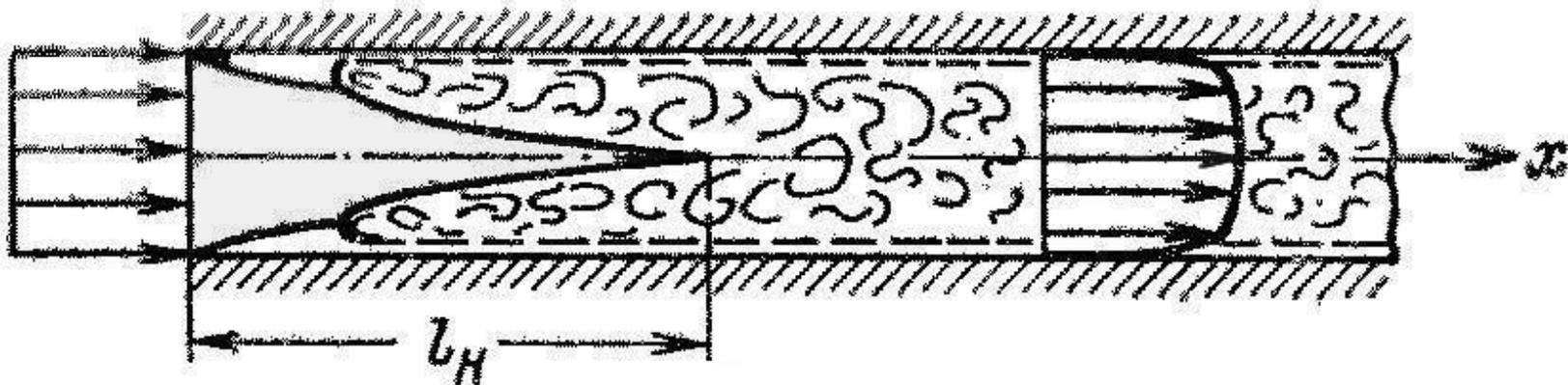
$$Re = \frac{\rho V d}{\mu}$$

$d$  — диаметр трубопровода

$Re < 2000 - 3000$



$Re > 10000$



$$Q = \rho v F = \text{const}$$

Закон сохранения массы  
(расхода)

$$\frac{d}{dx}(Qv) = -F \frac{dp}{dx} - \tau_W \chi$$

Закон сохранения количества  
движения

$\chi$  - смоченный периметр

$$\tau_W = \frac{1}{8} \xi \rho v^2 \quad - \text{напряжение трения}$$

$$T_0 = T + \frac{v^2}{2c_p} \neq \text{const}$$

Закон сохранения энергии

$$p = R\rho T$$

Уравнение состояния

$$(M^2 - 1) \frac{1}{v} \frac{dv}{dx} = \frac{-1}{T} \frac{dT_0}{dx} - \frac{\gamma \xi}{8 r_r} M^2$$

$r_r = F/\chi$  - гидравлический радиус ( для круглого трубопровода  $r_r = r/2$  )

## Режимы теплового взаимодействия

1. Теплоизолированное течение

$$T_0 = \text{const}$$

2. Изотермическое течение

$$T = \text{const}$$

$$T_0 = T + \frac{v^2}{2c_p}$$

# Теплоизолированное течение

$$T_0 = \text{const}$$

$$\left(1 - \frac{1}{M^2}\right) \frac{1}{v} \frac{dv}{dx} = -\frac{\gamma \xi}{8 r_T}$$

если  $M < 1$  то  $\frac{dv}{dx} > 0$  предельное значение на выходе  $v = a$

1

$$P(\lambda_1) - P(\lambda) = \frac{\gamma \xi}{\gamma + 1} \frac{d}{l} (x - x_1)$$

где  $P(\lambda) = \ln \lambda + 1/(2\lambda^2)$   $\lambda = v/a_*$  2  $a_0^2 = \frac{\gamma + 1}{2} a_*^2$

3

$$\xi = \frac{\gamma + 1}{\gamma} \frac{d}{l} [P(\lambda_1) - P(\lambda_B)]$$

$\lambda_1$  - коэффициент скорости на входе  
 $\lambda_B$  - коэффициент скорости на выходе

алгоритм  
расчета

3

$\xi$

1

$\lambda$

2

$v$

$$\rho = Q / (Fv)$$

$$T = T_0 - \frac{1}{2c_p} v^2$$

# Изотермическое течение

$$T = \text{const}$$

$$\ln \frac{v}{v_1} + \frac{RT}{2v_1^2} \left[ \left( \frac{v_1}{v} \right)^2 - 1 \right] = -\frac{\xi}{2d} (x - x_1)$$

$$Q = \frac{p v F}{RT} \rightarrow p v = \text{const}$$

4

$$\ln \frac{p_1}{p} + \frac{RT}{2v_1^2} \left[ \left( \frac{p}{p_1} \right)^2 - 1 \right] = -\frac{\xi}{2d} (x - x_1)$$

5

$$\xi = \frac{2d}{(x - x_1)} \left\{ \ln \frac{p}{p_1} + \frac{RT}{2v_1^2} \left[ 1 - \left( \frac{p}{p_1} \right)^2 \right] \right\}$$

6

алгоритм

расчета

6

$\xi$

5

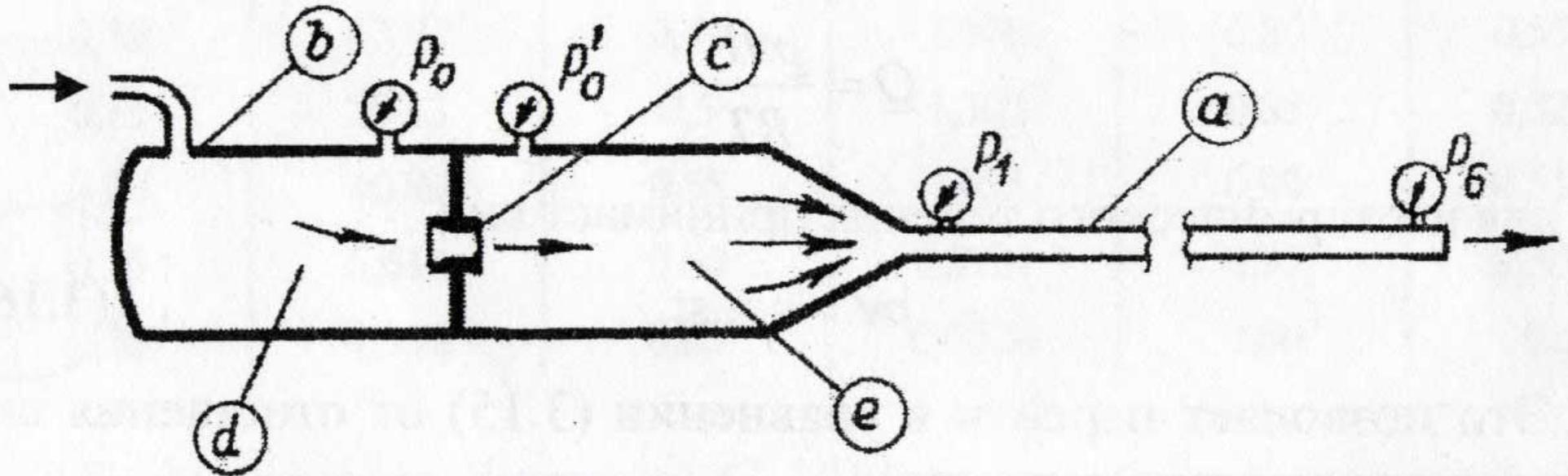
$p$

4

$v = v_1 (p_1 / p)$

$\rho = Q / (Fv)$

## Схема экспериментальной установки



$$Q = \frac{f(\gamma, R) p_0 F_*}{\sqrt{T_0}}$$

$$f(\gamma, R) = 0,0404 \frac{\sqrt{\text{град} \cdot \text{с}}}{\text{М}}$$

$$q(M_1) = \frac{p_0 F_*}{p'_0 F_1}$$

$$v_1 = M_1 a_1 = \sqrt{\gamma R T_0} M_1 \sqrt{\tau(M_1)}$$

$$p_1 = p'_0 \pi(M_1);$$

$$\rho_1 = \rho'_0 \varepsilon(M_1).$$

## Экспериментальные данные

Избыточное давление в атмосферах							
$p_0$	$p'_0$	$p_1$	$p_2$	$p_3$	$p_4$	$p_5$	$p_6$
10	4,37	4,12	3,8	3,13	2,43	0,87	0
11	4,88	4,63	4,25	3,5	2,75	1,02	0,01
14	6,25	5,88	5,5	4,5	3,55	1,56	0,24
20	9	8,75	8,13	6,75	5,33	3,58	0,76
4	1,6	1,5	1,38	1,07	0,74	0,15	-0,035

При  $p_0=11, 14, 20$  ати в выходном сечении трубопровода  $M=1$  ( $\lambda=1$ )!

$$d_{mp} = 10 \text{ мм}$$

$$d_* = 4 \text{ мм}$$