

Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего  
образования "Санкт-Петербургский государственный  
технологический институт (технический университет)"

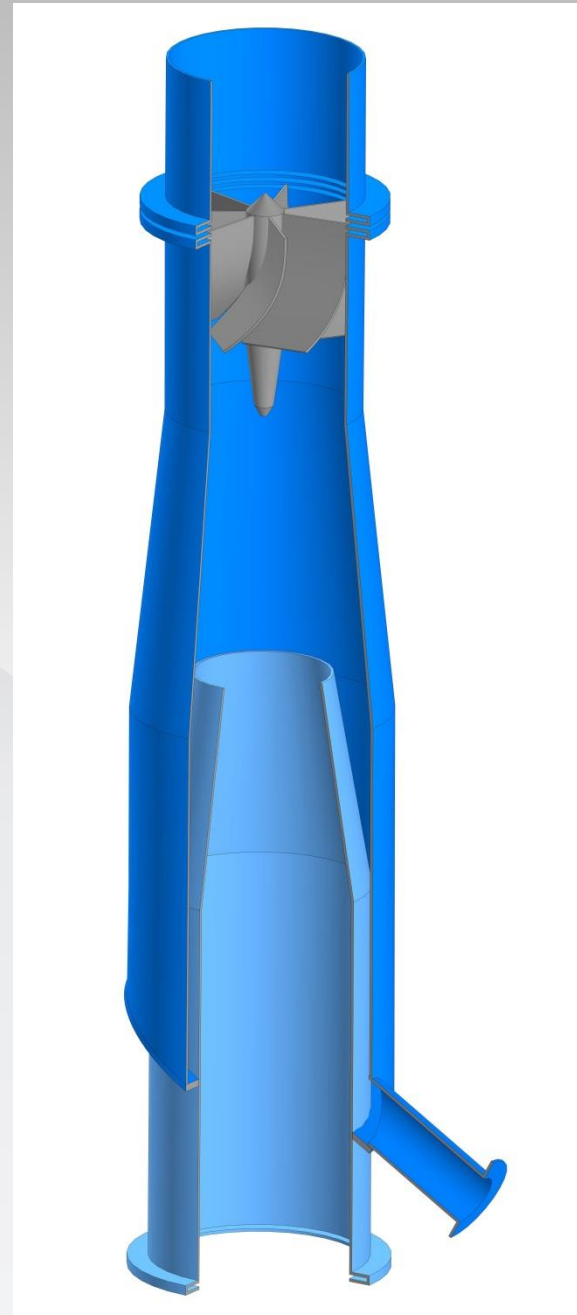
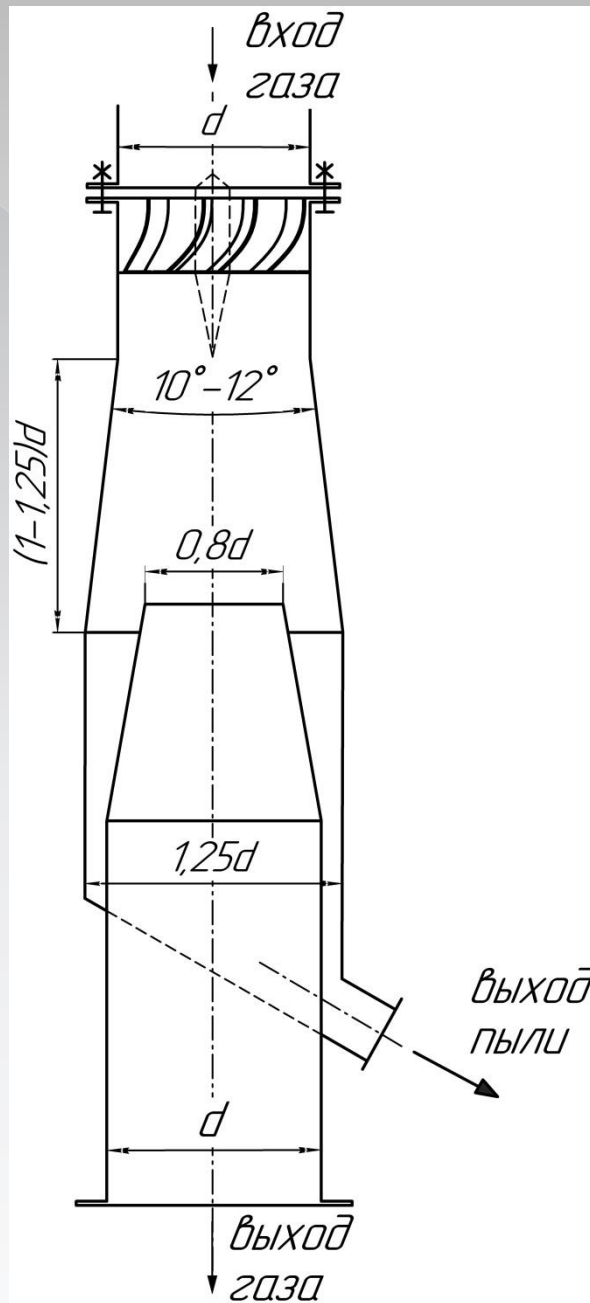
Топталов  
Валерий Сергеевич

ОЧИСТКА ЗАПЫЛЕННЫХ ГАЗОВ  
В ПРЯМОТОЧНЫХ ЦИКЛОНАХ

ДОКЛАД

Научный руководитель:  
д.т.н, профессор О. М. Флисюк

# Запатентованная конструкция прямооточного циклона



## Уравнения движения газа

$$w_r \frac{\partial w_r}{\partial r} + w_z \frac{\partial w_r}{\partial z} = -\frac{w_\varphi^2}{r}; \quad (1)$$

$$w_r \frac{\partial w_\varphi}{\partial r} + w_z \frac{\partial w_\varphi}{\partial z} = -\frac{w_\varphi w_r}{r}; \quad (2)$$

$$w_r \frac{\partial w_z}{\partial r} + w_z \frac{\partial w_z}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{dp}{dz}. \quad (3)$$

Условные обозначения:

$w_r(r, z)$ ,  $w_\varphi(r, z)$ ,  $w_z(r, z)$  – радиальная, тангенциальная и осевая составляющие скорости газа, м/с;

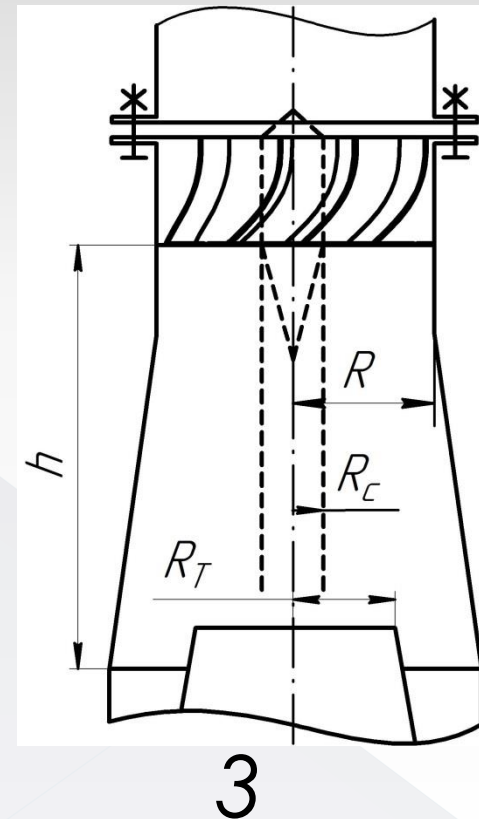
$p(z)$  – давление, Па

Граничные условия:

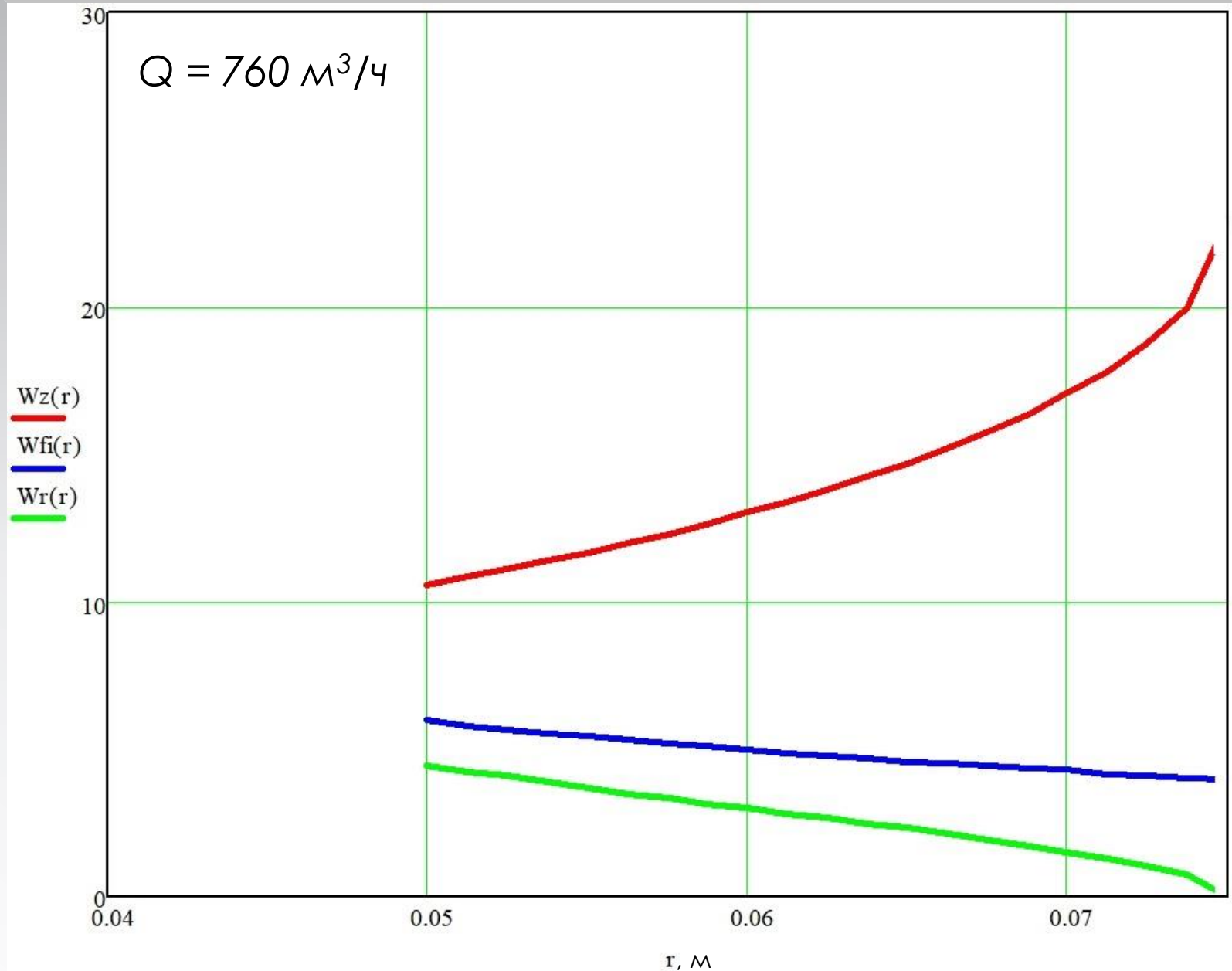
$$w_r(r, z) = 0 \quad \text{при } r = R$$

$$w_\varphi(R_c, 0) = V \cos \beta$$

$$Q = \iint_S w_z(r, z) ds = const$$



# Профили продольной, тангенциальной и радиальной составляющих скорости газа в области закрученного потока



# Уравнения движения частицы

$$\frac{\partial v_r}{\partial t} = f(w_r - v_r) + \frac{v_\varphi^2}{r}; \quad (4)$$

$$\frac{\partial v_\varphi}{\partial t} = f(w_\varphi - v_\varphi) - \frac{v_r v_\varphi}{r}; \quad (5)$$

$$\frac{\partial v_z}{\partial t} = f(w_z - v_z) \quad (6)$$

Условные обозначения:

$$f = 18\mu/\rho_p d^2, \text{ с}^{-1}$$

$v_r(r, z)$ ,  $v_\varphi(r, z)$ ,  $v_z(r, z)$  – радиальная, тангенциальная и осевая составляющие скорости частицы, м/с;

$\mu$  – коэффициент динамической вязкости газа, Па·с;

$\rho_p$  – плотность частицы, кг/м<sup>3</sup>;

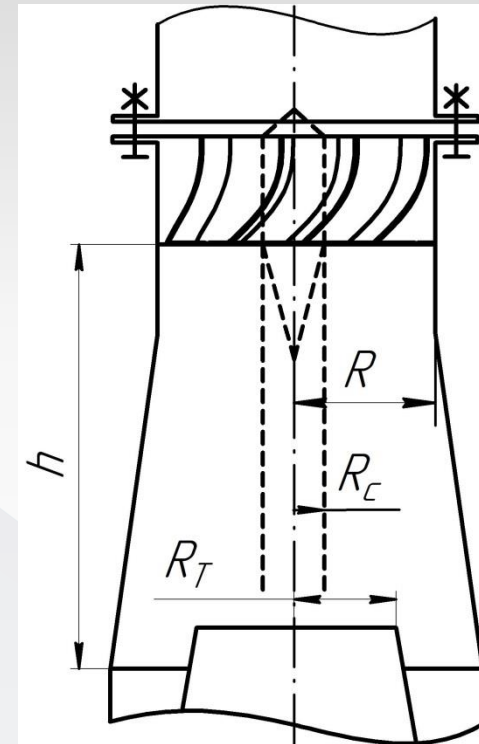
$d$  – характерный размер частицы, м;

$$\frac{dr}{dt} = v_r, \quad \frac{dz}{dt} = v_z.$$

Начальные условия:  $r_p(0) = R_c$ ,  $\frac{dr_p(0)}{dt} = w_r(R_c) = \frac{V}{R} \cos\beta \sqrt{R^2 - R_c^2}$

$$z_p(0) = 0, \quad \frac{dz(0)}{dt} = w_z(R_c) = \frac{Q}{S} - \frac{1}{3} A \sqrt{R^2 - R_c^2}.$$

$$A = \frac{R\Delta p}{\rho h R_c V \cos\beta}, \quad S = \pi(R^2 - R_c^2)$$



$$r_p(t) = R_c + R \ln \frac{R}{R - t w_r(R_c)} \quad (7)$$

Выражение  $r_p(t)$  позволяет определить время  $T_r$ , за которое частица при своем движении в камере разделения в радиальном направлении выйдет за границы патрубка для очищенного газа:

$$T_r = \frac{R^2}{V \cos \beta \sqrt{R^2 - R_c^2}} \left(1 - e^{-\frac{R_T - R_c}{R}}\right) \quad (8)$$

$$z_p(t) = w_z(R_T)t - \frac{1}{f} [w_z(R_T) - w_z(R_c)] (1 - e^{-ft}) \quad (9)$$

Время  $T_z$  - время пребывания частицы в камере – можно найти из условия  $z_p(T_z) = h$  ( $h$  - высота камеры разделения):

$$T_z = \frac{h}{w_z(R_T)} + \frac{1}{f} \left[1 - \frac{w_z(R_c)}{w_z(R_T)}\right] (1 - e^{-fT_z}) \quad (10)$$

Решение неравенства  $T_z > T_r$ , позволяет определить минимальный размер частиц, которые могут быть уловлены циклоном.

# Перенос частиц пыли в турбулентном следе завихрителя

$$\frac{dn}{dz} = -\frac{2}{R_c} \left[ \frac{w_r(R_c)}{w_z(R_c)} - \frac{1}{Pe_t} \right] n \quad (11)$$

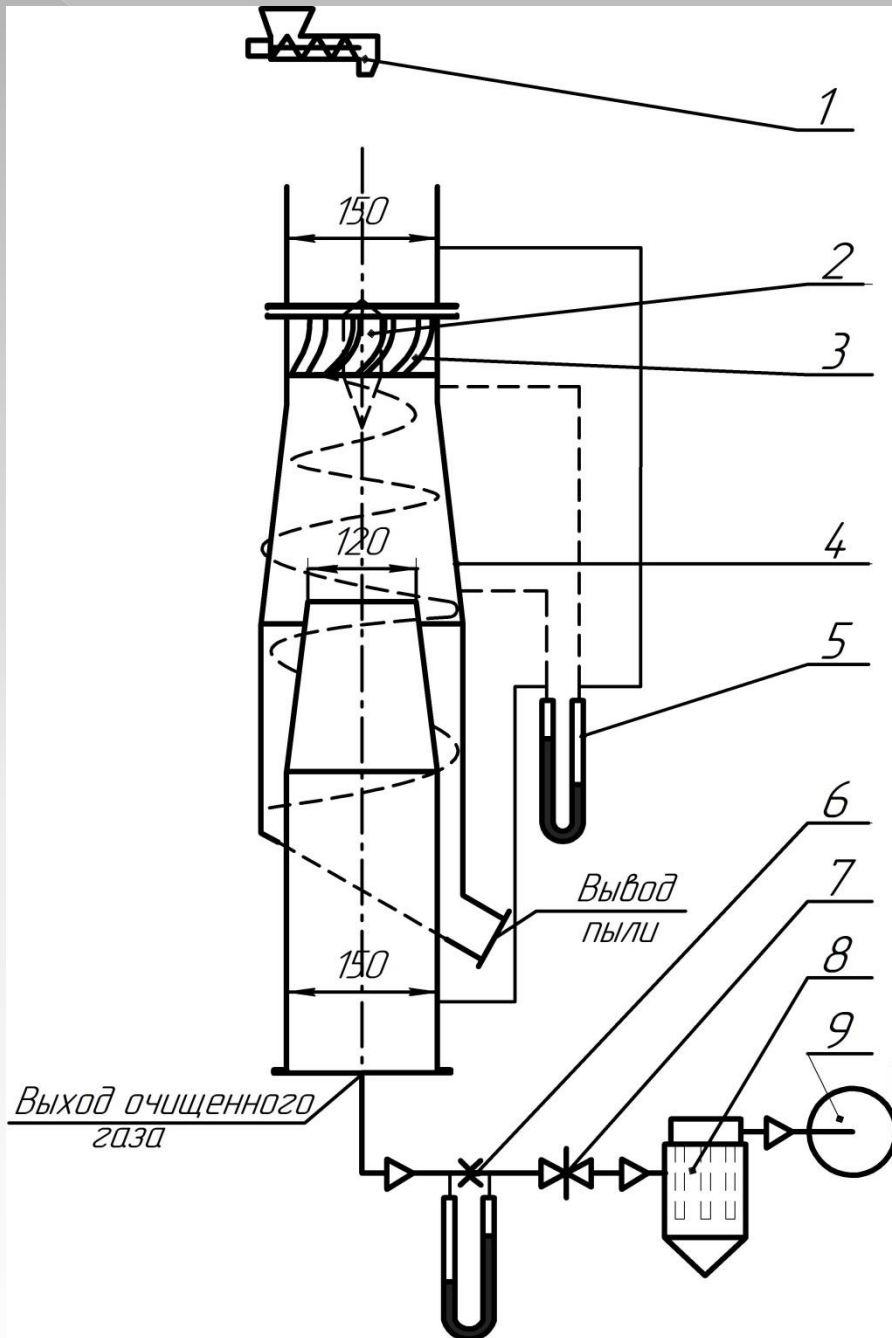
$$F = 1 - \frac{n(h)}{n(0)} = 1 - \exp \left\{ -\frac{2}{R_c} \left( \frac{w_r(R_c)}{w_z(R_c)} - \frac{1}{Pe_t} \right) \right\} \quad (12)$$

$n$  – число частиц пыли в единице объема газа,  $\text{м}^{-3}$

$Pe_t = \frac{R_c w_z(R_c)}{D_t}$  - число Пекле, рассчитанное по радиусу следа

$R_c$ , продольной скорости газа в этой зоне  $w_z(R_c)$  и коэффициенту турбулентной диффузии частиц  $D_t$

# Схема экспериментальной установки



- 1 – шнековый дозатор;
- 2 – завихритель;
- 3 – лопасть завихрителя;
- 4 – прямоточный циклон;
- 5 – дифманометр;
- 6 – диафрагма с дифманометром;
- 7 – шиберная заслонка;
- 8 – рукавный фильтр;
- 9 – центробежный вентилятор



# Установка и завихрители



$\beta = 30^\circ$



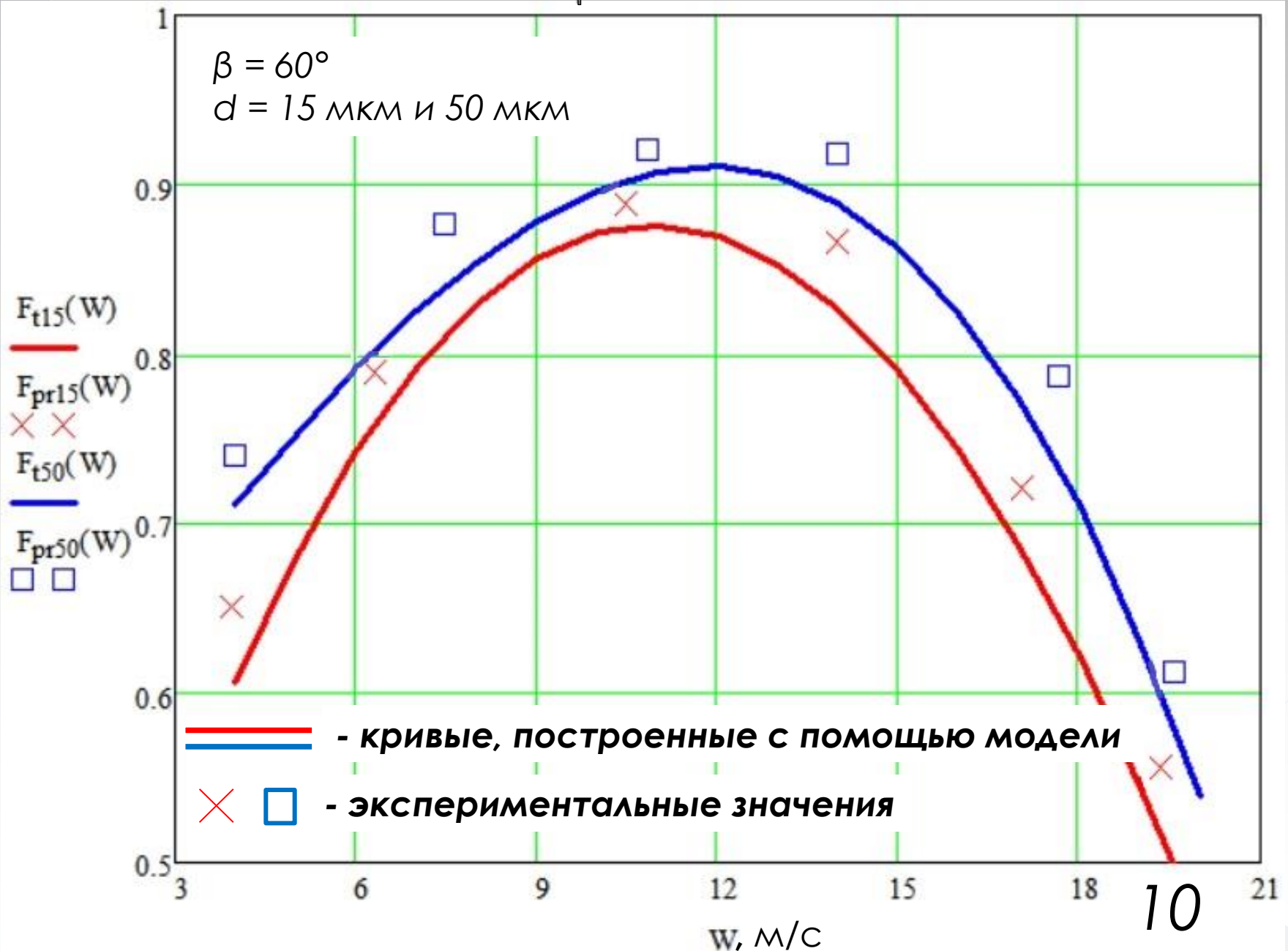
$\beta = 45^\circ$



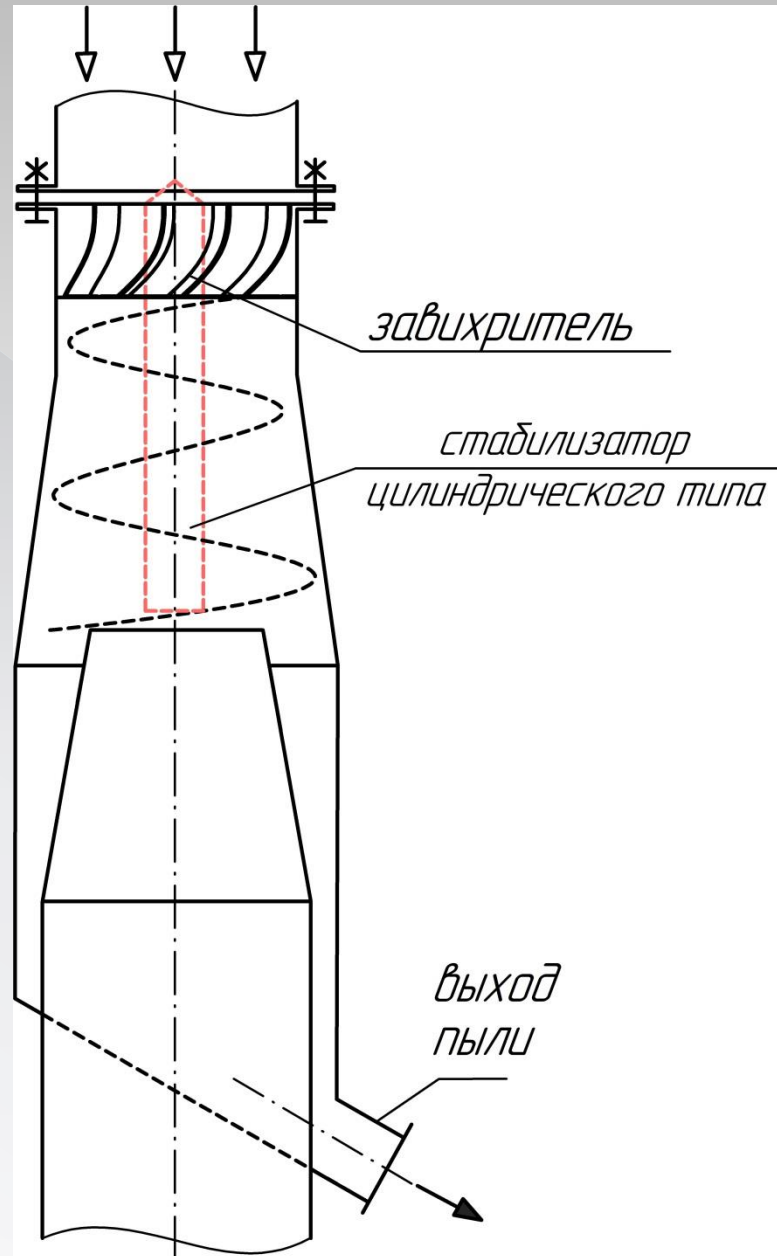
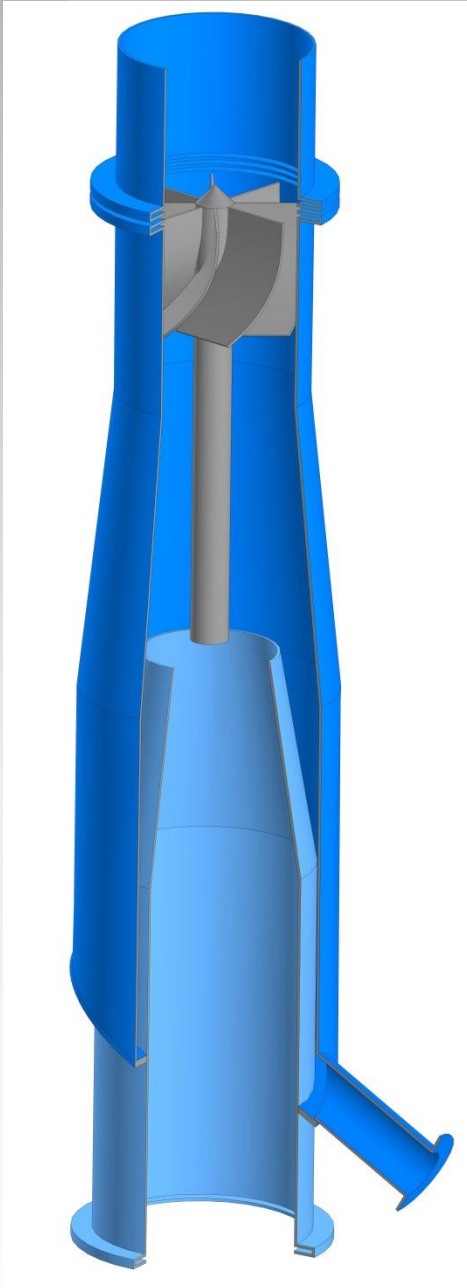
$\beta = 60^\circ$



# Проверка адекватности модели для циклона с завихрителем I типа



# Циклон с завихрителем II типа



# Уравнение конвективной диффузии частиц в циклоне с завихрителем II типа

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \langle v_r \rangle \frac{\partial C}{\partial r} = D_{ef} \frac{\partial^2 C}{\partial r^2} \quad (13)$$

$$C(t, r) = C_H \exp \left\{ \frac{1}{2} Pe_{ef} \frac{(r - R_c)}{R} - \frac{\langle v_r \rangle^2}{4D_{ef}} t \right\} \quad (14)$$

$$Pe_{ef} = \frac{\langle v_r \rangle R}{D_{ef}} \quad (15)$$

Условные обозначения:

$C(t, r)$  - концентрация частиц;

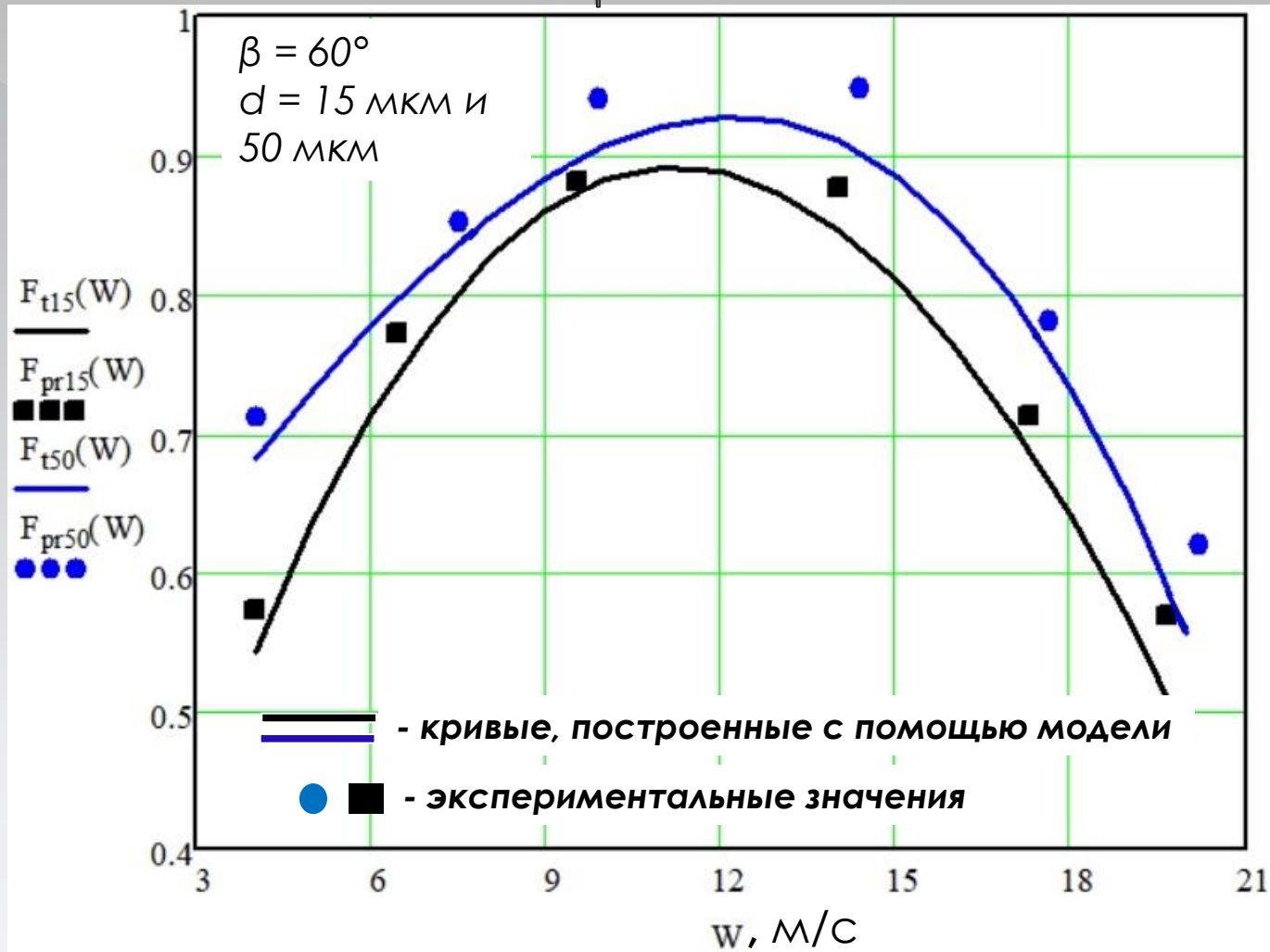
$D_{ef}$  - эффективный коэффициент обратного перемешивания в радиальном направлении;

$\langle v_r \rangle$  - средняя по сечению скорость частиц в радиальном направлении.

Граничные условия:

$C(0, R_c) = C_H$ , где  $C_H$  - концентрация частиц в исходном потоке.

# Проверка адекватности модели для циклона с завихрителем II типа

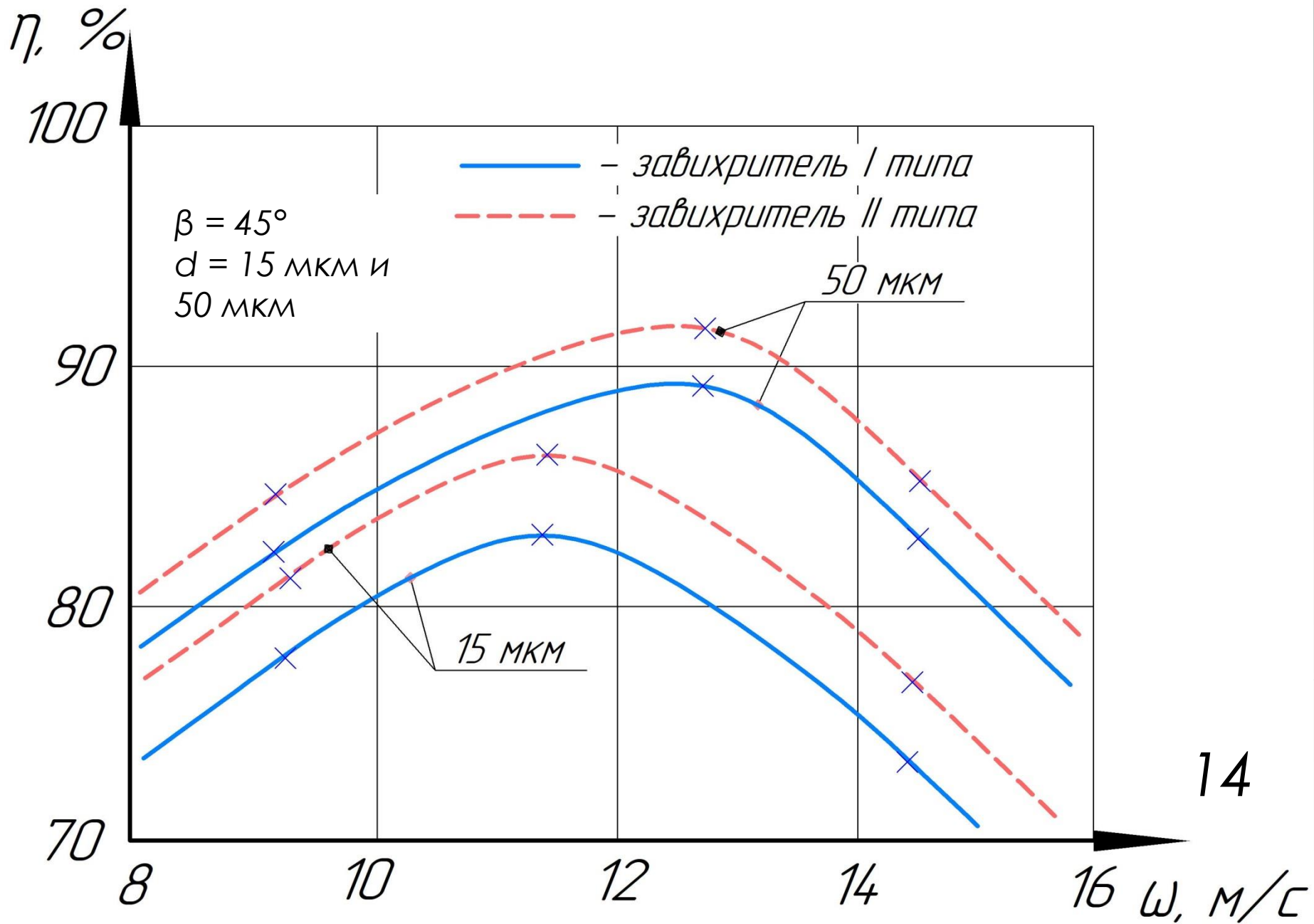


$$F = \frac{C_H - C(T_Z, R_c)}{C_H} = 1 - \exp\left(-\frac{\langle v_r \rangle^2 T_Z}{4D_{ef}}\right) \quad (16)$$

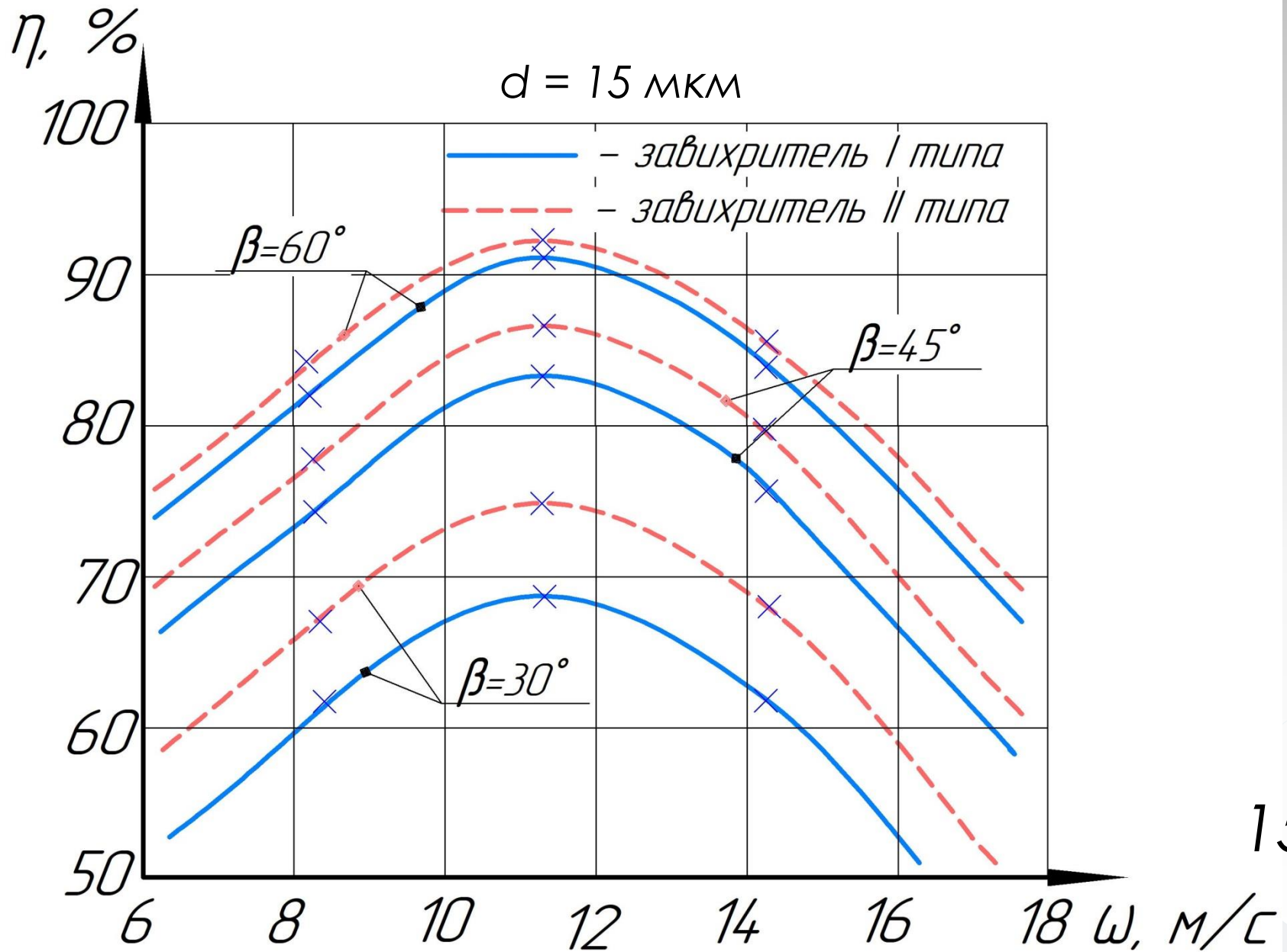
$C(T_Z, R_c)$  – концентрация частиц в газе, покидающей разделительную камеру через патрубок для выхода очищенного газа.



# Эффективность циклона от скорости потока

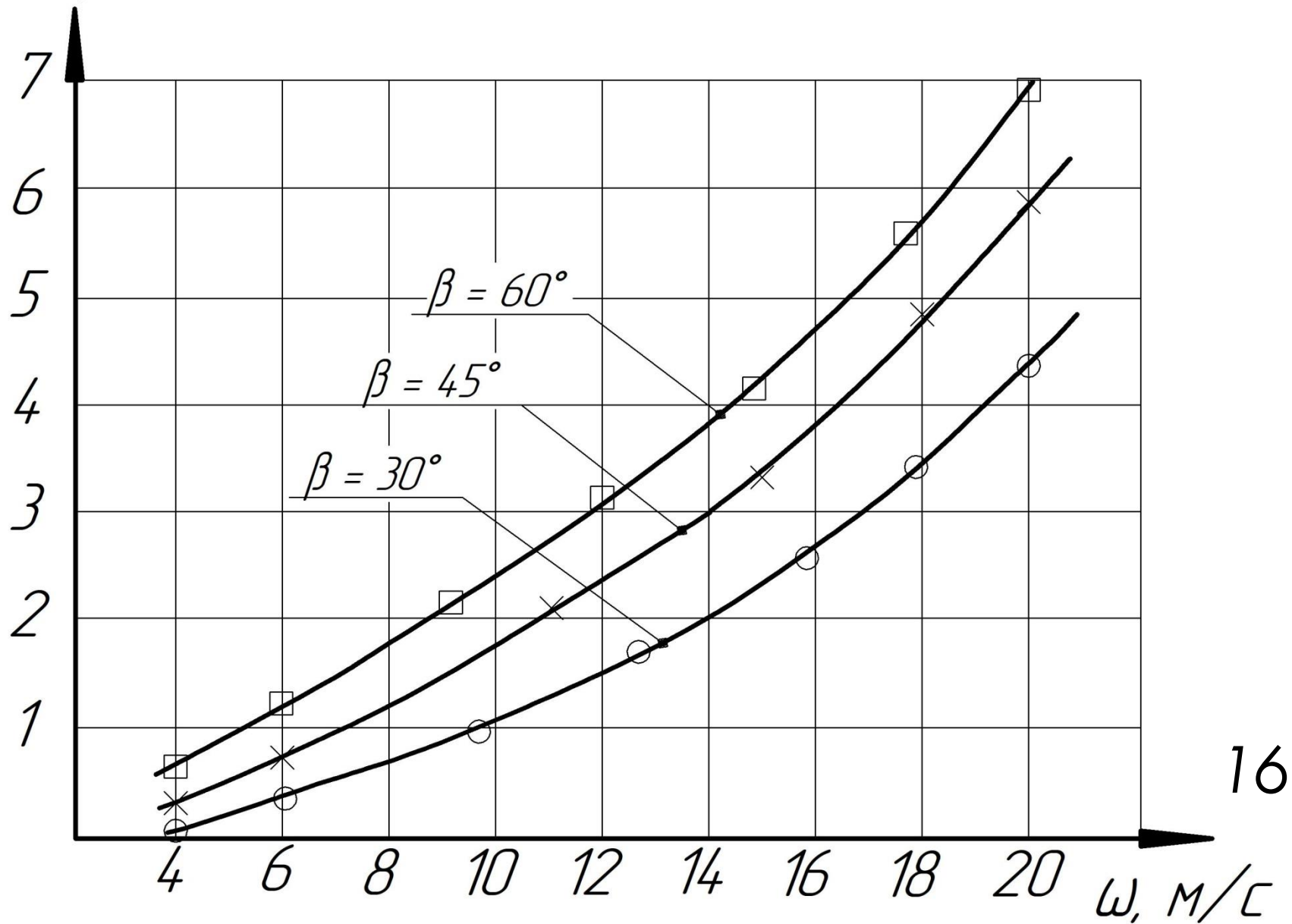


Эффективность циклона от скорости потока  
при различных углах закрутки лопастей завихрителя



# Гидравлическое сопротивление циклона

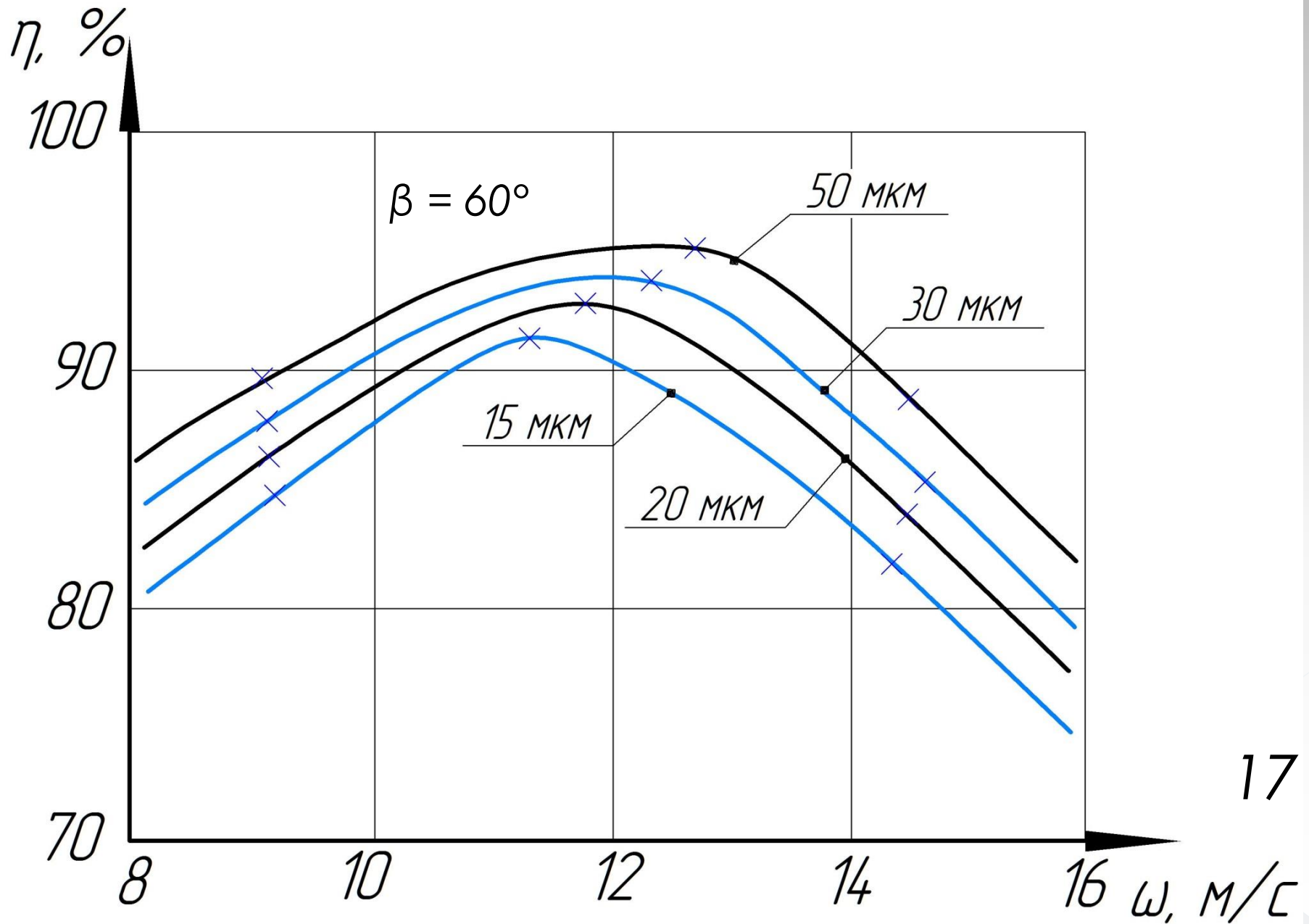
$\Delta P \times 10^{-2}, \text{Па}$



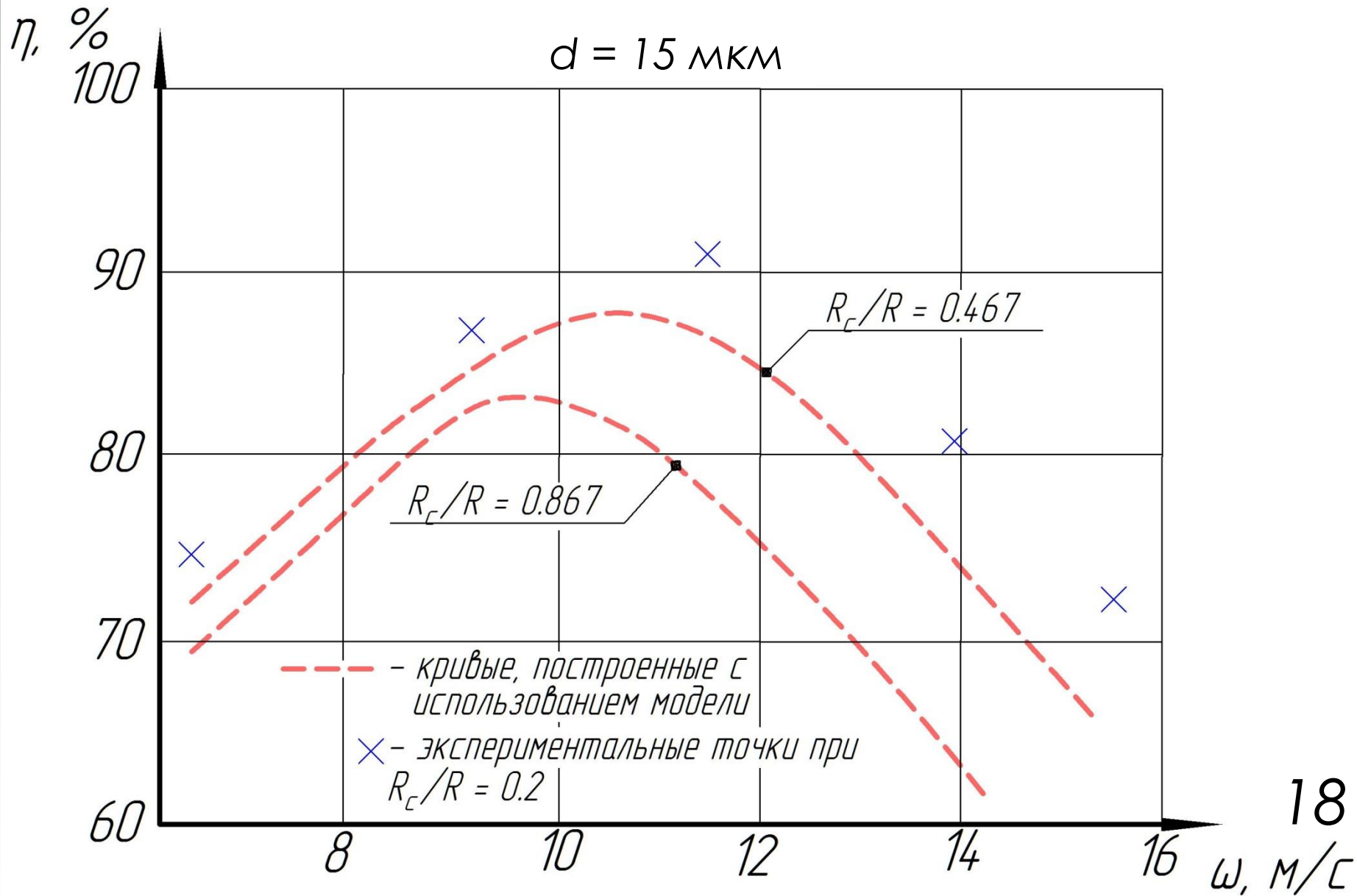
16



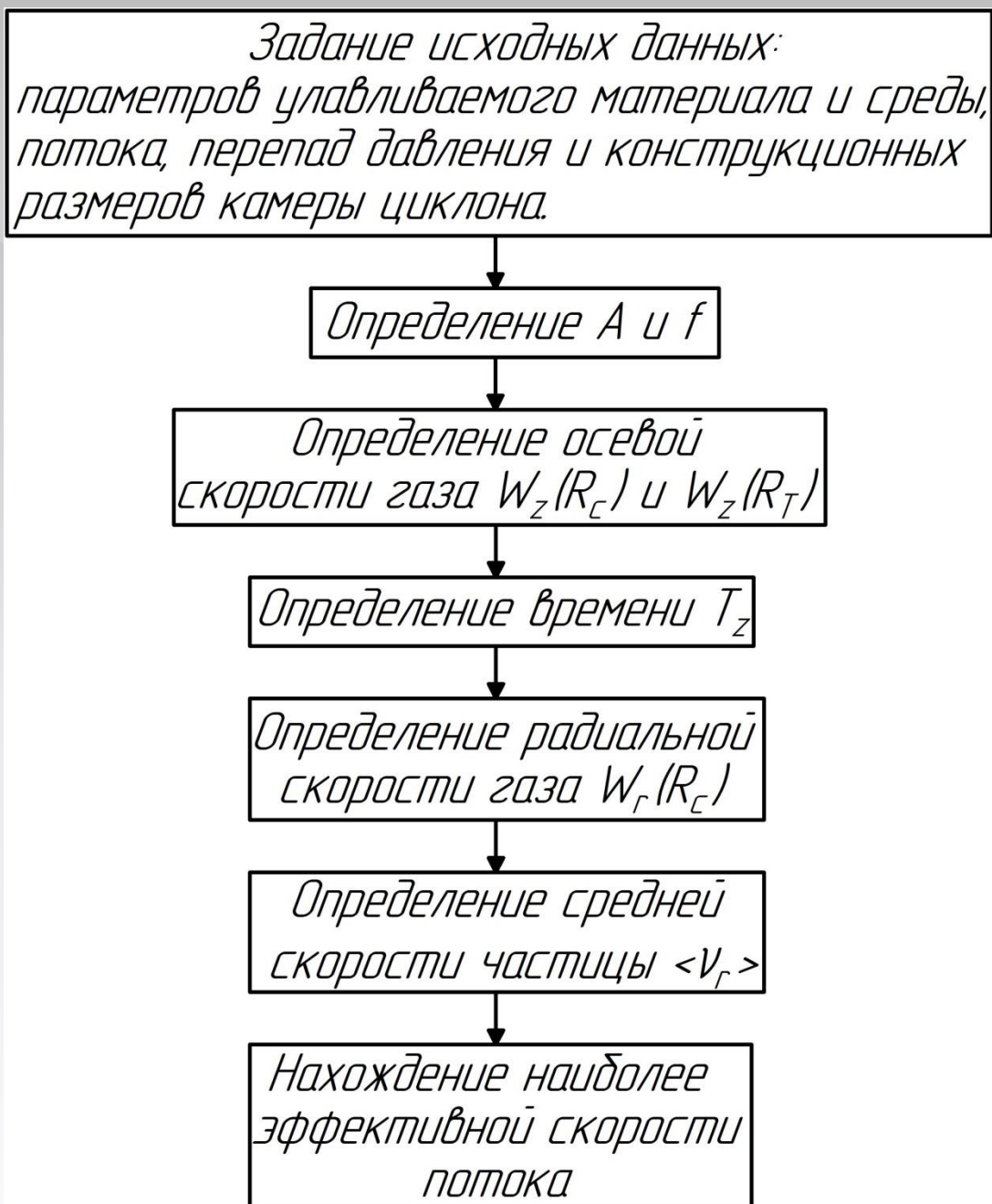
# Эффективность циклона с завихрителем II типа от скорости потока



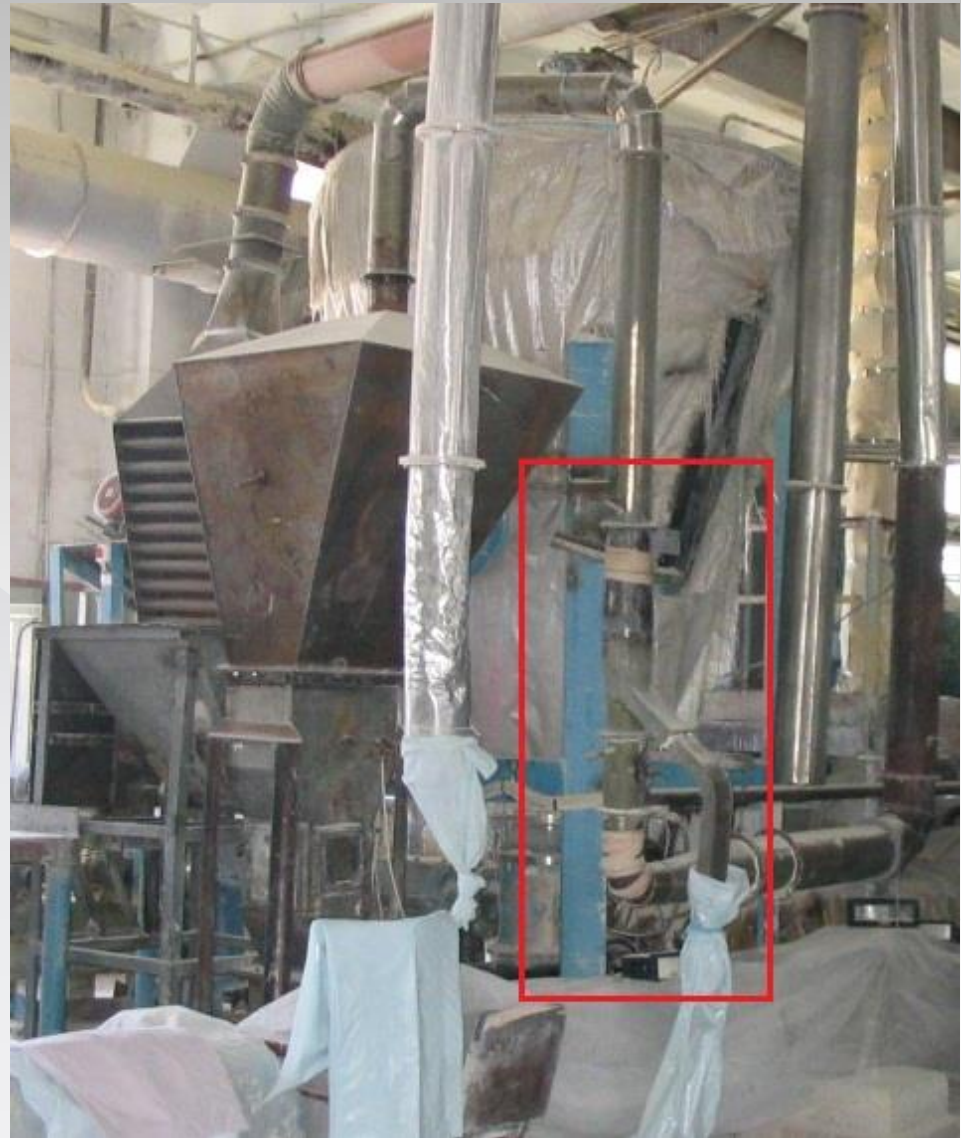
# Эффективность циклона от скорости потока при различных соотношениях $R_c/R$



# Методика расчета наиболее эффективной скорости











## Общие выводы и результаты работы

1. Предложена и защищена патентом РФ конструкция вертикального прямоточного циклона.
2. Разработана адекватная математическая модель циклона, позволяющая определить его эффективность.
3. Экспериментальные исследования циклона показали, что при работе циклона всегда существует оптимальная с точки зрения очистки скорость газа. Исследована зависимость эффективности и гидравлического сопротивления циклона от угла закрутки лопастей завихрителя.
4. Основные результаты работы – циклон и математическая модель были использованы ООО «ИНТЕХПРОЕКТ» и ООО «Диома» при проектировании технологических линий.
5. На основе модели разработана инженерная методика расчета, позволяющая определить наиболее эффективную скорость газа в циклоне при различных конструктивных параметрах и дисперсности пыли.