

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Потетенко О.В., Панченко Н.С. Вихревой характер движения жидкости в спиральной камере и медилопаточных каналах направляющего аппарата высоконапорных радиально-осевых гидротурбин РО500 // Гидравлические машины. - Харьков, 1973, вып.7. - С. 3-9.
2. Ласенко В.Е., Булгаков В.А., Дранковский В.Е. Некоторые результаты экспериментального исследования структуры потока в спиральной камере и направляющем аппарате высоконапорной радиально-осевой турбины РО310 // Гидравлические машины. - Харьков, 1976, вып.10. - С. 77-80.
3. Ласенко В.Е., Булгаков В.А., Олейников А.А., Пащенко Ю.Г. О структуре потока в спиральной камере высоконапорной гидротурбины // Тр. Моск.энерг.ин-та, 1986, вып 98. - С. 83-89.
4. Михайлов И.Е. Турбинные камеры гидроэлектростанций. - М.: Энергия, 1970.
5. Виктор Г.В. Первая двухмерная задача для спиральных камер // Тр. Моск.энерг.ин-та, 1979, вып 404. - С. 12-18.
6. Виктор Г.В. Численное решение первой двухмерной задачи для спиральной камеры // Тр. Моск.энерг.ин-та, 1981, вып 543. - С. 15-22.
7. Косторной С.Д., Нагорный М.В., Неня В.Г. Численный расчет плоского потенциального течения жидкости в каналах произвольной формы // Гидравлические машины. - Харьков, 1988, вып.22. - С. 59-62.

Поступила в редколлегию 17 мая 1999 г.

УДК 621.928.9

РАСЧЕТ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ ПЫЛЕУЛОВИТЕЛЕЙ СО ВСТРЕЧНЫМИ ПОТОКАМИ

*А.Р.Якуба, проф.; С.А.Кузько, инж.; А.Н.Калашников, инж.;
В.М.Герасимив, адъюнкт; Л.И.Фарисей, инж.*

Гидравлическое сопротивление центробежных пылеуловителей в большинстве случаев рассчитывается с использованием опытных коэффициентов сопротивления, величина которых определяется конструкцией пылеуловителя. Такой метод является оценочным, он не приемлем для новых типов аппаратов.

Метод теоретического расчета сопротивления циклонных пылеуловителей впервые предложен в 50-х годах немецким исследователем Вальтером Бартом [1,2]. Но такой метод, с одной стороны, рекомендован применительно к циклонам, а, с другой стороны, его применение сталкивается с большими трудностями из-за отсутствия в период создания метода моделей расчета поля скоростей в аппарате. Предложенные в [3,4] методы расчета характеристических скоростей носили эмпирический характер, искажающий саму сущность теоретического подхода.

Разработанные авторами статьи методы расчета поля скоростей вихревых камер позволяют упростить расчеты циклонов и впервые в инженерной практике применить метод В. Барта для прогнозирования сопротивления аппаратов со встречными закрученными потоками (АВЗП) [5].

Схема АВЗП представлена на рисунке. Запыленный газ подается в виде двух потоков, направленных навстречу один другому. Большая часть (2 части) подается сверху и называется вторичным потоком (расход 2ч.); меньшая часть (1ч.) подается снизу. Образующий совместный поток имеет более равномерное распределение скоростей и давлений по высоте пылеуловителя и позволяет более эффективно улавливать частицы пыли. Концепция В. Барта состоит в отдельных определениях сопротивления

центробежного пылеуловителя: на входе (от завихрения до центрального вихря); и на выходе (в центральном вихре и в выходной трубе).

$$\Delta P_{\text{вх}} = \frac{\rho u_a^2 r_a}{2 r_i} - \frac{\rho u_i^2 r_i}{2 r_a} + \frac{\rho u_i^2}{2}, \quad (1)$$

$$\Delta P_{\text{вых}} = \frac{\rho}{2} v_i^2 \left[k \left(\frac{u_i}{v_i} \right)^4 + \left(\frac{u_i}{v_i} \right)^2 \right], \quad (2)$$

где u - тангенциальная скорость; v - осевая скорость; i - в выходной трубе; e - во входном патрубке; a - на стенке корпуса; k - коэффициент ($k=4,4$ - цилиндрический аппарат с тангенциальным входом, $k=3,4$ для улиточного входа).

Методику расчета В.Барта с применением методов расчета поля скоростей других авторов изложим на примере расчета сопротивления сопротивления промышленного аппарата АВЗП диаметром 1900 мм со следующими параметрами:

$r_a = r_0 = 0,95$ м; $r_1 = 0,15$ м; $r_2 = 0,5$ м;
 $r_3 = r_i = 0,6$ м; $r_4 = r_i = 0,6$ м; $H = 4$ м;
 $L_1 = 15000$ н м³/час; $L_2 = 30000$ н м³/час;
 $b_1 = b_2 = 0,35$; $a_2 = 1,5$ м; $a_1 = 0,75$ м; $t = 250$ °С,
 где n - нормальные условия ($t = 20$ °С, $p = 1$ ат).

Вычисление массового расхода газа:

$$G_1 = L_1 \rho_n = 15000 \cdot 1,21 = 18150 \text{ кг/ч};$$

$$G_2 = L_2 \rho_n = 30000 \cdot 1,21 = 36300 \text{ кг/ч}.$$

Плотность газа при $t = 250$ °С

$$\rho_{250} = 1,293 \frac{T_0}{T_0 + t} = 1,293 \frac{273}{273 + 250} = 0,675 \text{ кг/м}^3.$$

Вязкость газа при $t = 250$ °С, $\mu = 0,028 \cdot 10^{-3}$ Па·с:

$$\nu = 2,5 \cdot 10^{-5} / 0,675 = 42 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с},$$

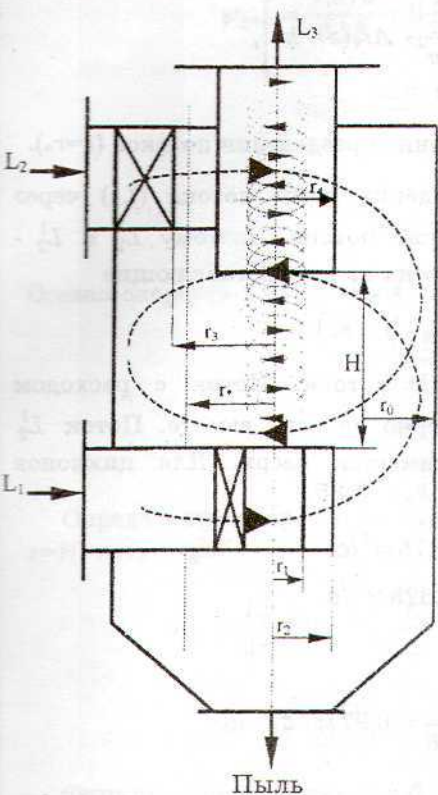
$$L_{1t} = \frac{G_1}{\rho \cdot t} = \frac{18150}{0,675} = 27000 \text{ м}^3/\text{ч} = 7,5 \text{ м}^3/\text{с},$$

$$L_{2t} = 54000 \text{ м}^3/\text{ч} = 15 \text{ м}^3/\text{с}.$$

1. Вычисление сопротивления по вторичному потоку.

1.1. Функция тока на стенке выхлопной трубы [4]

Рисунок 1



$$r_i = r_4 = r_* = 0,6 \text{ м}, \quad z = H = 4 \text{ м},$$

$$\psi_2 = \frac{L_1^1}{2\pi} + \left[1 + \frac{r_*^2 - r^2}{r_0 - r_*^2} \right] \left[\frac{L_2^1}{2\pi} + Ar_*(z - h) \right],$$

где $\psi_{2*} = \psi_{24} = \frac{L_1^1}{2\pi} + \frac{L_2^1}{2\pi}$ - функция тока на границе разделения потоков ($r=r_*$).

Расчеты проводятся для случая прохождения всего потока (L_3) через верхний вход АВЗП при отсутствии первичного потока. Поэтому L_1^1 и L_2^1 - значения расходов раздвоения вторичного потока на две составляющие

$$L_1^1 = l_3 \cdot k_r, \quad L_2^1 = l_3 \cdot (1 - k_r).$$

Здесь k_r - коэффициент раздвоенности потока. Поток с расходом L_1^1 проникает в центральный вихрь равномерно по всей высоте. Поток L_2^1 доходит до нижней части АВЗП и поднимается вверх. Для циклонов $k_r = 0,25 - 0,5$, поэтому принят усредненный $k_r = 0,35$.

$$L_1^1 = 0,35 \cdot 22,5 = 7,875 \text{ м}^3/\text{с},$$

$$L_2^1 = 0,65 \cdot 22,5 = 14,625 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Усредненная радиальная скорость

$$A = \frac{L_2^1}{2\pi H r_*} = \frac{14,625}{6,28 \cdot 4 \cdot 0,6} = 0,97 \text{ м/с}.$$

Функция тока на границе разделения

$$r = r_*, \quad z = H, \quad \psi_{2*P} = \frac{22,5}{6,28} = 3,58 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Тангенциальная скорость на границе разделения

$$U_* = \frac{\pi r_*^2 c_0 \psi_{2*}}{2L_3 r_*},$$

$$c_0 = \frac{4v_{e2}(r_0^3 - r_3^3)}{3r_4^2(r_0^2 - r_3^2)},$$

где $v_{e2} = \frac{L_3}{a_2 b_2} = \frac{22,5}{1,5 \cdot 0,35} = 42,86 \text{ м/с}$ - входная скорость;

$$c_0 = \frac{4 \cdot 42,86}{3 \cdot 0,6^2} \cdot \frac{0,95^3 - 0,6^3}{0,95^2 - 0,6^2} = 187,56 \text{ 1/с} - \text{угловая скорость в выхлопной}$$

трубе;

$$u_{*H} = \frac{3,14 \cdot 0,6 \cdot 187,56 \cdot 3,58}{2 \cdot 22,5} = 28,17 \text{ м/с}.$$

Функция тока на границе разделения потоков в нижней части аппарата

$$r = r_*, \quad z = 0,$$

$$\psi_{2*0} = \frac{7,875}{6,28} + 1 \left[\frac{14,625}{6,28} - 0,97 \cdot 0,6 \cdot 0,4 \right] = 1,254 \text{ м}^3/\text{с},$$

$$u_{*0} = \frac{3,14 \cdot 0,6 \cdot 187,56 \cdot 1,254}{2 \cdot 22,5} = 9,85 \text{ м/с},$$

$$u_{*cp} = \frac{28,13 + 9,85}{2} = 19 \text{ м/с}.$$

Осевая скорость в выхлопной трубе

$$u_4 = \frac{3L_3}{\pi D_4^2} = \frac{4 \cdot 22,5}{3,14 \cdot 1,2^2} = 19,9 \text{ м/с},$$

$$\frac{u_i}{v_4} = \frac{u_4}{v_4} = \frac{19}{19,9} = 0,955.$$

Определение скорости на стенке аппарата ($u_a = u_0$). Функция тока в точке $z=H, r=r_0 = r_a$:

$$\psi_{2a} = \frac{L_1^1}{2\pi} + [1 - 1] \cdot \left[\frac{L_2^1}{2\pi} + A(z - H) \right] = \frac{L_1^1}{2\pi} = \frac{7,875}{6,28} = 1,254 \text{ м}^3/\text{с},$$

$$u_{aH} = \frac{\pi r_a^2 C_0 \psi_{ra}}{2L_3 r_a} = \frac{3,14 \cdot 0,36 \cdot 187,56 \cdot 1,254}{2 \cdot 22,5 \cdot 0,95} = 6,22 \text{ м/с}.$$

Функция тока в точке $z = 0, r = r_0$:

$$\psi_2 = \frac{L_1^1}{2\pi} + [1 - 1] = \frac{L_1^1}{2\pi} = 1,254 \text{ м}^3/\text{с},$$

$$u_{a0} = 6,22 \text{ м/с},$$

$$u_{acr} = 6,22 \text{ м/с}.$$

Входные потери давления

$$\Delta p_{вх} = \frac{0,675}{2} \cdot \frac{6,22^2 \cdot 0,95}{0,6} - \frac{0,675}{2} \cdot \frac{19^2 \cdot 0,6}{0,95} + \frac{0,675}{2} \cdot 19^2 = 66 \text{ Па}.$$

Выходные потери давления

$$\Delta p_{вых} = \frac{0,675 \cdot 19,9^2}{2} \cdot \left[4,4 \cdot 0,955^3 + 0,995^2 \right] = 675,2 \text{ Па}.$$

Общее сопротивление по второму каналу:

$$\Delta p_2 = \Delta p_{\text{вх}} + \Delta p_{\text{вых}} = 66 + 675,2 \text{ Па},$$

$$\xi_{02} = \frac{2\Delta p_2}{\rho v_a^2} = \frac{2 \cdot 741,2}{0,675 \cdot 7,94^2} = 15,9,$$

$$u_a = \frac{4L_3}{\pi D_0^2} = \frac{4 \cdot 22,5}{3,14 \cdot 1,9^2} = 7,94 \text{ м/с}.$$

2. Сопротивление по первичному потоку.

Как и в предыдущем случае, предполагаем, что весь поток газа с $L_3=22,5 \text{ м}^3/\text{с}$ проходит через первичный завихритель. Основная часть потока $L_1^1=(1-k_r)L_3$ проходит в выхлопную трубу, меньшая часть $L_2^1=k_r L_3$ движется у стенки АВЗП и постепенно проникает в центральную зону:

$$L_1^1 = 0,65 \cdot 22,5 = 14,625 \text{ м}^3/\text{с};$$

$$L_2^1 = 0,35 \cdot 22,5 = 7,875 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Функция тока $z = 0, r = r_* = 0,6 \text{ м}$:

$$\psi = \frac{L_1^1}{2\pi} + \frac{L_2^1}{2\pi} \left[1 - \frac{r_*^2 - r^2}{r_0^2 - r_*^2} \right] + A \cdot r_* \left[\frac{r_*^2 - r^2}{r_0^2 - r_*^2} z + (z - H) \right],$$

$$A = \frac{L_2^1}{2\pi H r_*} = \frac{7,875}{6,28 \cdot 4 \cdot 0,6} = 0,522;$$

$$\psi_{1*} = \frac{14,625}{6,28} + \frac{7,875}{6,28} \cdot 1 + 0,522 \cdot 0,6 \cdot (-4) = 2,33 \text{ м}^3/\text{с};$$

$$v_{ei} = \frac{L_3}{a_1 b_1} = \frac{22,5}{0,75 \cdot 0,35} = 85,7 \text{ м/с}.$$

Угловая скорость вращения в выхлопной трубе

$$C_0 = \frac{4}{3r_4^2} \left[u_{ei} \frac{r_2^3 - r_1^3}{r_2^2 - r_1^2} \right] = \frac{4}{3 \cdot 0,6^2} \left[85,7 \frac{0,5^3 - 0,15^3}{0,5^2 - 0,15^2} \right] = 169,7 \text{ 1/с}.$$

Функция тока и тангенциальная скорость $z = 0, r = r_* = r_4 = 0,6 \text{ м}$:

$$\psi_{1*0} = 2,33,$$

$$C_0 = 169,7 \text{ 1/с},$$

$$u_{*0} = \frac{\pi r_* C_0 \psi_2}{2L_3} = \frac{3,14 \cdot 0,6 \cdot 169,7 \cdot 2,33}{2 \cdot 22,5} = 16,55 \text{ м/с}.$$

Эти же параметры в точке $z = H, r = r_*$:

$$\psi_{1*H} = \frac{14,625}{6,28} + \frac{7,875}{6,28} [1] + 0,522 \cdot 0,6 \cdot 0 = 3,58 \text{ м}^3/\text{с},$$

$$u_{*H} = \frac{3,14 \cdot 0,6 \cdot 169,7 \cdot 3,58}{2 \cdot 22,5} = 25,43 \text{ м/с},$$

$$u_{*cp} = \frac{16,55 + 25,43}{2} = 21 \text{ м/с}.$$

Функция тока и тангенциальная скорость на стенке аппарата $z = 0$,
 $r = r_a = 0,95$ м, $H = 4$ м:

$$\psi_{1a0} = \frac{L_1^1}{2\pi} + \frac{L_2^1}{2\pi} [1 + 1] + Ar_* [0 + (-4)] = 3,59 \text{ м}^3 / \text{с},$$

$$u_{a0} = \frac{\pi r_*^2 c_0 \psi_{1a}}{2L_3 r_a} = \frac{3,14 \cdot 0,36 \cdot 169,7 \cdot 3,59}{2 \cdot 22,5 \cdot 0,95} = 16,1 \text{ м} / \text{с}.$$

Те же параметры в точке $z = H$, $r = r_a = 0,95$ м :

$$\psi_{1aH} = \frac{L_1^1}{2\pi} + \frac{L_2^1}{2\pi} [1 + 1] + Ar_* [(-1) \cdot 4 + 0] = 3,69 \text{ м}^3 / \text{с},$$

$$u_{1aH} = 16,1 \text{ м} / \text{с}; \quad u_{acp} = 16,1 \text{ м} / \text{с}.$$

Сопротивление аппарата на входе

$$\Delta p_{ex} = \frac{\rho}{2} \left[\frac{u_a^2 r_a}{r_i} - \frac{u_i^2 r_i}{r_a} + u_i^2 \right] = \frac{0,675}{2} \left[\frac{16,12 \cdot 0,95}{0,6} - \frac{21^2 \cdot 0,6}{0,95} + 21^2 \right] = 572,9 \text{ Па}.$$

Сопротивление аппарата на выходе

$$\Delta p_{вых} = \frac{\rho u_i^2}{2} \left[k \cdot \left(\frac{u_i}{v_i} \right)^{\frac{4}{3}} + \left(\frac{u_i}{v_i} \right)^2 \right] = \frac{0,675 \cdot 21^2}{2} \left[4,4 \left(\frac{21}{19,9} \right)^{\frac{4}{3}} + \left(\frac{21}{19,9} \right)^2 \right] = 780,9 \text{ Па},$$

$$\Delta p_1 = \Delta p_{ex} + \Delta p_{вых} = 572,9 + 780,9 = 1353,8 \text{ Па},$$

$$\zeta_{01} = \frac{2\Delta p_1}{\rho v_a^2} = \frac{2 \cdot 1353,8}{0,675 \cdot 63} = 63,7.$$

3. Сопротивление АВЗП.

Кратность потоков, соответствующая минимуму потерь [5] ΔP ,

$$k^* = \frac{1}{\left(1 + \sqrt{\frac{\zeta_2}{\zeta_1}} \right)} = \frac{63,7}{\left(1 + \sqrt{\frac{15,9}{63,7}} \right)} = 0,67,$$

здесь $\varepsilon = \frac{L_2}{L_1} = \frac{15}{7,5} = 2$ - соотношение потоков;

$$k = \frac{L_2}{L_3} = \frac{\varepsilon}{1 + \varepsilon} = \frac{2}{3} = 0,67 \text{ - кратность потоков.}$$

Минимальный коэффициент сопротивления

$$\zeta^* = \frac{\zeta_1}{\left(1 + \sqrt{\frac{\zeta_1}{\zeta_2}} \right)^2} = \frac{63,7}{\left(1 + \sqrt{\frac{63,7}{15,9}} \right)^2} = 6,8.$$

Фактический коэффициент сопротивления

$$\xi = \xi^* \left(\frac{k}{k^*} \right) = 6,8 \left(\frac{0,67}{0,67} \right) = 6,8.$$

Теоретическое сопротивление АВЗП

$$\Delta p = \xi \cdot \rho \cdot \frac{v_a^2}{2} = 6,8 \cdot 0,675 \cdot \frac{7,94^2}{2} = 144,6 \text{ Па} = 15 \text{ мм в. ст.}$$

$\Delta p_{\text{эксп}} = 35 \text{ мм в. ст.}$ – данные промышленной эксплуатации;

$\Delta p_{\text{эксп}} = K \cdot \Delta p_{\text{теор}}$; $K = \Delta p_{\text{эксп}} / \Delta p_{\text{теор}} = 35 / 15 = 2,33$,

где K – коэффициент пересчета теоретических потерь в действительные.

4. Расчет коэффициентов сопротивления лабораторного АВЗП.

4.1. Исходные данные.

Лабораторный АВЗП имеет следующие параметры:

$D_0 = 145 \text{ мм}$; $H = 0,12 \text{ м}$;

$D_H = 70 \text{ мм}$; $D_1 = 30 \text{ мм}$; $D_2 = 85 \text{ мм}$; $a_1 \times b_1 = 50 \times 20 \text{ мм}$; $a_2 \times b_2 = 60 \times 20 \text{ мм}$;

$L_3 = 160 \text{ м}^3/\text{ч} = 4,44 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3/\text{с}$; $\Delta p_{\text{эксп}} = 50 \text{ мм в. ст.}$

4.2. В соответствии с вышеприведенным методом получены следующие показатели сопротивления АВЗП-145:

$\xi_{02} = 60,0$; $\xi_{01} = 80$; $\xi^* = 32$;

$k = 0,5$; $k^* = 0,536$; $\xi = 34,5$;

$\Delta p_{\text{теор}} = 149,6 = 15 \text{ мм в. ст.}$, $K = 3,33$.

Исходя из полученных коэффициентов пересчета

$D_{01} = 1,9 \text{ м}$; $K = 2,33$;

$D_{01} = 0,145 \text{ м}$; $K = 3,33$.

Предлагается выбирать коэффициент пересчета теоретических значений сопротивлений в действительные по зависимости

$$K = 3,41 - 0,57D_0.$$

Предлагаемые значения пересчетных коэффициентов приведены в таблице:

D_0 , мм	0,25	0,5	0,75	1,0	1,25	1,5	1,75	2,0	2,25
K	3,27	3,12	2,98	2,84	2,70	2,56	2,41	2,27	2,12

ВЫВОДЫ

Использован метод Вальтера Барта для расчета сопротивления центробежных аппаратов со встречными закрученными потоками. Расчет поля скоростей производился по разработанному авторами математическим зависимостям. Для расчета действительных потерь установлена зависимость коэффициента пересчета от диаметра аппарата.

SUMMARY

The method of Walter Barth was made used of the calculation resistance centrifugal apparatuses with contrary twisted streams. The calculation of structures of streams was made on work out of the mathematician dependence of the authors. For the calculation of real resistance was placed the dependence of coefficient recalculation from diameters apparatuses.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. W. Barth. Berechnung und Auslegung von zyklonabscheidern auf Grund neuerer Untersuchungen // Brennstoff-warme-kraft. Bd. 8, № 1, 1956. - S. 1-10.
2. W. Barth, L. Leinweber. Beurteilung und Auslegung von zyklonabscheidern // Stoub, Bd. 24, № 2, 1964. - S. 41-84.
3. Якуба А.Р., Кузько С.А. Структура потоков вихревых камер // Материалы 8-й международной научно-технической конференции «Насосы-96». - Украина: Сумы, 1996. - С.297-299.
4. Якуба А.Р. Гидродинамика и эффективность пылеуловителей с закрученными потоками в процессах химической технологии красителей, пигментов и вспомогательных веществ: Дисс. докт. техн. наук.- Сумы: СумГУ, 1996. - 378 с.
5. Гудым Л.И. Разработка, исследование и внедрение в промышленность первичной переработки текстильного сырья высокоэффективных систем очистки воздуха с вихревыми пылеуловителями: Дисс. докт. техн. наук.- М.: МТИ, 1992. - 403 с.

Поступила в редколлегию 14 февраля 2000 г.

УДК 622.002

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ НЕПОЛНОПОТОЧНЫХ ФИЛЬТРОВ

*З.Л.Финкельштейн, проф.; Аль-хавалдех Абдалла Сулейман, асп.
(Донбасский горно-металлургический институт)*

Гидродинамические самоочищающиеся неполнопоточные фильтры [1] нашли широкое применение в различных отраслях промышленности. Принципиальная схема их работы состоит в том, что поток загрязненной жидкости, поступающий в фильтр, делится на два потока: один проходит через фильтрующую перфорированную перегородку (фильтроэлемент), очищается, второй движется вдоль этой перегородки, смывая осевшие на ней частицы и сбрасывая их в отстой. За счет соотношения скоростей этих потоков регулируется тонкость очистки и обеспечивается постоянная "открытость" ячеек в фильтроэлементе. Для поддержания постоянного соотношения между скоростями очищенного потока при прохождении через фильтроэлемент и смывающего потока вдоль фильтроэлемента выполняется сужающий кольцевой зазор, в котором движется загрязненная жидкость.

Исходными данными для расчета фильтра являются: пропускная способность фильтра, допускаемая доля жидкости, идущей в смыв, тонкость очистки, вязкость жидкости, характеристика материала фильтроэлемента.

Задачей расчета является определение размеров фильтроэлемента, размеров изменяющегося зазора в щели, перепада давления на фильтроэлементе.

Расчет движения частицы, расположенной в загрязненной зоне и находящейся под действием многих сил, потребовал для своего решения таких допущений: жидкость считаем несжимаемой, однородной и изотермической; частицы шарообразны и однородны, отсутствуют электростатические или поверхностные силы, силы адгезии, не учитываются влияние стенок и взаимодействие движущихся частиц, не учитывается броуновское движение; движение характеризуется малыми числами Рейнольдса; не учитывается инерционность частиц, т.е. не учитывается проскальзывание частицы относительно жидкости в продольном потоке; не учитывается возможный дрейф частицы из-за её вращения под действием различных скоростей на ее поверхности; фильтроэлемент представляет собой