

УДК 66.069.832

В. В. Алексеев, И. И. Поникаров

# ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПЫЛЕУЛАВЛИВАНИЯ ЦИКЛОНОВ В ПРОИЗВОДСТВЕ СУХОЙ МОЛОЧНОЙ СЫВОРОТКИ

Ключевые слова: теплогенератор, насос-дозатор, циклон, просеиватель.

В производстве сухой молочной сыворотки нашли широкое применение основные циклоны и циклоны для пневмотранспорта. Существенным недостатком таких циклонов является низкая эффективность улавливания частиц пыли размером менее 10 мкм, в связи с чем их использование ограничивается предварительной очисткой [1]. Поэтому в данной статье для повышения эффективности пылеулавливания циклонов в производстве сухой молочной сыворотки проведен анализ их работы и даны рекомендации по их совершенствованию и разработке нового оборудования.

Keywords: heatgenerator, pump-batcher, cyclone, proseivatel.

In production of dry whey the main cyclones and a cyclone the pneumoconveyor found broad application. Essential lack of such cyclones is low efficiency of catching of particles of a dust less than 10 microns in size in this connection their use is limited to preliminary cleaning [1]. Therefore in this article for increase of efficiency of a dust removal of cyclones in production of dry whey the analysis of their work is carried out and recommendations about their improvement and development of the new equipment are made.

## Введение

На кафедре машин и аппаратов химических производств КНИТУ ведется разработка циклонного оборудования для технологических и санитарных процессов, в которых образование жидких шламовых отходов недопустимо или когда переработка последних экономически не рентабельна.

Традиционный способ пылеулавливания (см. рис. 1) состоит в том, что пылегазовая смесь вводится в закручивающее устройство 1, приобретает вращательно-поступательное движение в кольцевом канале между внутренней стенкой циклона 2 и наружной стенкой выхлопной трубы 3 по нисходящей винтовой спирали.

Твердые частицы под действием центробежной силы перемещаются на периферию к стенке корпуса циклона и далее движутся по цилиндрической и конической стенке 4 вниз и выводятся из разгрузочного штуцера 5 в бункер (на схеме не показан).

Внутренний восходящий вихрь формируется внутри бункера и, взаимодействуя с внешним пылегазовым неочищенным, движется к выхлопному патрубку 3.

На наш взгляд, в процессе взаимодействия внешнего нисходящего вихря с внутренним восходящим при определенных расходных и конструктивных параметрах циклона происходит проникновение мелких твердых частиц из внешнего концентрированного во внутренний очищенный. Вынос твердых частиц в выходной патрубок снижает эффективность пылеуловителя.

В данной работе делается попытка дать анализ влияния аэродинамической обстановки в зоне взаимодействия восходящего очищенного и нисходящего неочищенного вихрей на эффективность

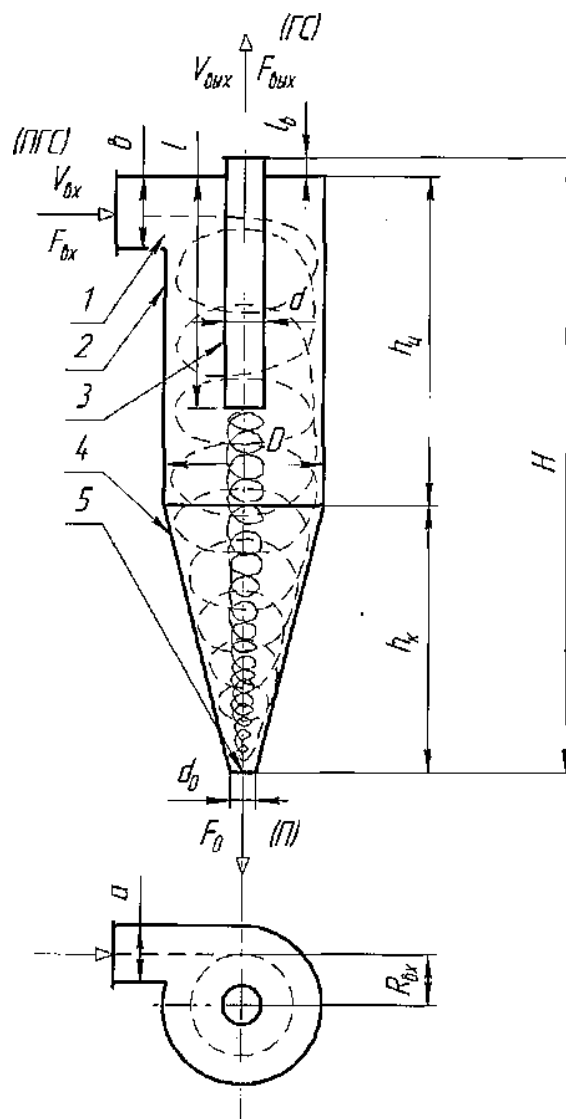


Рис. 1 – Схема противоточного циклона

пылеулавливания на основе рассмотрения расходных и конструктивных параметров отечественных циклонов. Наибольшее применение в практике отечественного пылеулавливания находят основные типы циклонов: НИИОГАЗ (ЦН - 11, ЦН - 15, ЦН - 15У, ЦН - 24, СДК - ЦН - 33, СК - ЦН - 34, СК - ЦН - 40 и СК - ЦН - 34М), СИОТ и ВЦНИИОТ [1, 3 - 5].

Закрученный поток, формируемый входным закручивающим устройством, является трехмерным и для его описания необходимо использование локальных параметров (поля скоростей  $V_x$  - осевой,  $V_\phi$  - окружной и  $V_r$  - радиальной компонент полной скорости  $V$ , а также поле давления -  $P$ ) и интегральных параметров (количества движения  $K$  и момента количества движения  $M$ ). Наиболее важным из них следует считать момент количества движения относительно оси циклона, который определяет основные особенности течения закрученного потока.

Действительный безразмерный параметр крутки нисходящего вихря  $\theta$  рассчитывался по формуле [2]:

$$\theta = \frac{M}{K \cdot R} = 2\pi \cdot \rho \cdot \int_{r_1}^R V_\phi \cdot v_x \cdot r^2 \cdot \frac{dr}{2\pi \int_{r_1}^R \rho \cdot V_x^2 \cdot r \cdot dr \cdot R},$$

где  $r_1 = d/2$  — наружный радиус выхлопной трубы, м;  $R = D/2$  - внутренний радиус циклона, м;  $\rho$  - плотность газа, кг/м<sup>3</sup>.

Расчетный безразмерный параметр крутки на входе в циклон  $\theta_{вх}$ , вычисленный по средним параметрам  $\theta$ , определялся по выражению [9]:

$$\theta_{вх} = M_{вх} / (K_{ср} \cdot R) = (F_k / F_{вх}) \cdot (R_{вх} / R) = \bar{R}_{вх} / K_T, \quad (2)$$

где  $F_k = \pi (D^2 - d^2) / 4$  - площадь кольцевого сечения, м<sup>2</sup>;  $F_{вх} = a^2$  - площадь входного патрубка, м<sup>2</sup>;  $R_{вх}$  - радиус входного момента количества движения, м;  $K_T = F_{вх} / F_k$  - конструктивный параметр крутки;  $\bar{R}_{вх} = R_{вх} / R$  - относительный радиус входного момента количества движения.

Основными конструктивными параметрами, влияющими на аэродинамику, гидравлическое сопротивление и эффективность пылеулавливания являются: конструктивный параметр крутки  $K_T$ ; кольцевой параметр  $\bar{d} = d/D$ , относительные высота  $\bar{B} = B/D$  и ширина  $\bar{a} = a/D$  тангенциального входа и относительные высоты выхлопной трубы  $\bar{I} = I/D$ , цилиндрической  $\bar{h}_ц = h_ц/D$  и конической  $\bar{h}_к = h_к/D$  частей циклона, а также относительный диаметр разгрузочного штуцера  $\bar{d}_0 = d_0/D$ .

Режимными параметрами процесса в циклоне служат скорость движения пылегазовой смеси на входе  $V_{вх}$ , распределение скоростей в зонах кольцевого сечения, в цилиндрической и конической частях, а также в выхлопном патрубке.

### Анализ влияния режимных параметров на эффективность пылеулавливания

Скорость движения газа во входном патрубке ( $V_{вх}$ ) в зависимости от конструктивных параметров

противоточных циклонов различной модификации варьируется в пределах от 15 до 25 м/с [3-5]. С увеличением скорости движения газа увеличивается эффективность пылеулавливания и растет гидравлическое сопротивление процесса. Однако, начиная с некоторой скорости, дальнейшее ее увеличение приводит к снижению эффективности пылеулавливания и увеличению сопротивления, что объясняется аэродинамической структурой потока в циклоне.

### Распределение скоростей в зоне кольцевого течения циклона

Авторы [6] исследовали аэродинамическую структуру потока в кольцевых каналах и трубах при значениях безразмерного параметра крутки на входе  $\theta_{вх} = 2,1 \div 8,4$  в автомодельном режиме. На рис. 2 представлены графики зависимости  $\bar{V}_\phi = V_\phi / V_{ср}$  и  $\bar{V}_x = V_x / V_{ср}$  от безразмерного радиуса  $\bar{r} = r/R$ , где  $V_{ср}$  - среднерасходная скорость движения газа в кольцевом канале или в трубе. Как видно из графика, интенсивная крутка является причиной образования обратных токов при  $\bar{r} \leq 0,4 \div 0,5$ . А при значениях безразмерного параметра крутки на входе  $\theta_{вх} > 8 \div 10$  обратные токи становятся более интенсивными и могут занимать большую область значений  $\bar{r} \leq 0,6 \div 0,7$ . Поэтому образование обратных восходящих токов в нисходящем вихре на выходе из кольцевого канала, по-видимому, вызывает транспорт мелких частиц из внешнего вихревого потока во внутренний восходящий и их унос в выхлопном патрубке. Чем более интенсивный сток твердых частиц, а этому подвержены более мелкие частицы диаметром  $d_q < 5 \div 10$  мкм, тем более уменьшается как общая  $\eta$ , так и фракционная  $\eta_1$  эффективность пылеулавливания. Поэтому при организации процесса пылеулавливания в циклонах (при оптимальных геометрических параметрах) безразмерный параметр крутки на входе  $\theta_{вх}$  должен выбираться в пределах от 5 до  $8 \div 10$ .

Сложная аэродинамическая структура потока в противоточном циклоне создается из-за конструктивных особенностей различных зон пылеулавливания: входной зоны, кольцевой, цилиндрической и конической. Пылеулавливание и пылеудержание в каждой из зон определяется не только дисперсным составом и плотностью частиц пыли, но и аэродинамическим распределением скоростей  $V_\phi$ ,  $V_x$ ,  $V_r$  газового потока и статическим давлением  $P$ .

Во входной зоне начальное пылеулавливание определяется геометрией закручивающего устройства: конструктивным параметром крутки  $K_T$ , кольцевым параметром  $\bar{a}$  и относительной высотой выхлопного патрубка  $\bar{I}$ .

В кольцевом канале с относительной высотой  $\bar{h}_ц$  идет трансформация поступательного движения во вращательно - поступательное с распределением скоростей, подобным распределению скоростей, изображенному на рис. 2. Конструктивными параметрами кольцевого канала являются кольцевой параметр  $\bar{a}$  и относительная высота  $\bar{h}_ц$ . Кольцевой параметр  $\bar{a}$  у отечественных циклонов меняется от

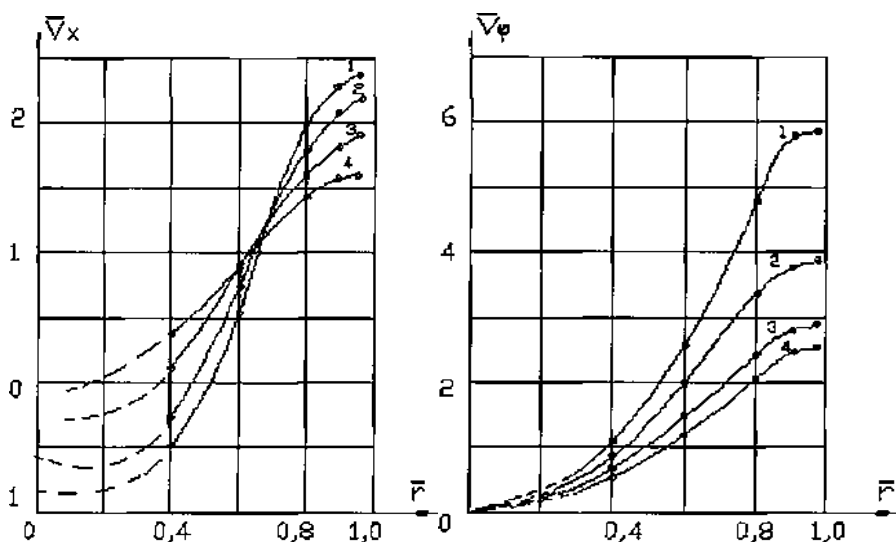
0,22 до 0,59 (см. табл. 1 и табл. 2). При уменьшении относительного диаметра выхлопной трубы  $\bar{a}$  за счет повышения скорости движения газа в ней сильно возрастает гидравлическое сопротивление в циклоне. Как правило, при уменьшении кольцевого параметра  $\bar{a}$  меняется и относительная высота  $\bar{I}$ .

В цилиндрической зоне пылеулавливания статическое давление под действием тангенциальной составляющей скорости  $V_\phi$  падает от его периферии

к центру и на оси циклона создается сильное разрежение, которое благоприятствует образованию внутреннего восходящего вихря. Во внешнем нисходящем вихре, направленные во внутреннюю сторону сжимающие усилия находятся в равновесии с центробежными силами. Пограничный пылегазовый слой у стенки циклона движется вращательно-поступательно вниз с меньшей скоростью и испытывает меньшие центробежные силы.

**Таблица 1 - Относительные размеры высокопроизводительных циклонов типа ЦН с постоянным отношением  $d/D=0,59$**

| Тип аппарата | $\alpha$ , град | $a/D$ | $b/D$ | $l/D$ | $h_{ц}/D$ | $h_{к}/D$ | $I_B/D$ | $d_0/D$ | $H/D$ |
|--------------|-----------------|-------|-------|-------|-----------|-----------|---------|---------|-------|
| ЦН-11        | 11              | 0,26  | 0,48  | 1,56  | 2,06      | 2,0       | 0,3     | 0,3÷0,4 | 4,36  |
| ЦН-15        | 15              |       | 0,66  | 1,74  | 2,26      | 2,0       | 0,3     |         | 4,56  |
| ЦН-15У       | 15              |       | 0,66  | 1,50  | 1,51      | 1,5       | 0,3     |         | 3,31  |
| ЦН-24        | 24              |       | 1,11  | 2,11  | 2,11      | 1,75      | 0,4     |         | 4,26  |



**Рис. 2 - Графики зависимости относительных  $\bar{V}_\phi$  и  $\bar{V}_x$  составляющих скорости от  $\bar{r}$  при значениях  $\theta_{vx}$ : 1 - 8,4; 2 - 4,4; 3 - 2,75; 4 - 2,1**

**Таблица 2 - Относительные размеры высокоэффективных циклонов типа СК и СДК**

| Тип аппа- | $d/D$ | $a/D$ | $b/D$ | $l/D$        | $h_{ц}/D$ | $h_{к}/D$ | $I_B/D$        | $d_0/D$ | $H/D$       |
|-----------|-------|-------|-------|--------------|-----------|-----------|----------------|---------|-------------|
| СК-ЦН-    | 0,22  | 0,18  | 0,40  | 0,70         | 0,40      | 2,60      | 0,30           | 0,18    | 3,30        |
| СДК-ЦН-33 | 0,33  | 0,26  | 0,535 | $\leq 0,835$ | 0,535     | 3,0       | $0,2 \div 0,3$ | 0,33    | $\leq 3,84$ |
| СК-ЦН-34  | 0,34  | 0,21  | 0,515 | $\leq 0,815$ | 0,515     | 2,11      | $0,2 \div 0,3$ | 0,23    | $\leq 2,93$ |
| СК-ЦН-40  | 0,40  | 0,15  | 0,38  | 0,70         | 0,535     | 3,0       | 0,3            | 0,20    | 3,835       |

В конической зоне пылеулавливания у стенки увеличивается перепад давления, и сжимающее газовый поток усилие становится намного больше центробежной силы, и поток в виде вторичного восходящего вихря движется внутрь, транспортируя с собой много мелких частиц пыли. Крупные частицы при своем движении отбрасываются к стенке аппа-

рата и уносятся нисходящим вихрем вниз к пылеосадительному бункеру.

Конструктивными параметрами конической зоны являются относительная высота  $\bar{h}_k$  и диаметр разгрузочного штуцера  $\bar{a}_0$ .

В табл. 3 представлены для различных типов циклонов значения конструктивных параметров:  $F_{\text{вх}}/D^2$ ,  $F_{\text{к}}/D^2$ ,  $K_{\text{т}}$ ,  $\bar{R}_{\text{вх}}$ ,  $\theta_{\text{вх}}$ , рассчитанных по уравнению (2) и коэффициента гидравлического сопротивления  $\zeta_0$  для циклона диаметром  $D = 500$  мм [5].

Анализ данных этой таблицы показывает, что для высокопроизводительных циклонов возможно повышение эффективности их работы за счет изменения конструктивных параметров - уменьшения площади входного патрубка  $F_{\text{вх}}$  и увеличения радиуса  $\bar{R}_{\text{вх}}$ , что позволит увеличить безразмерный входной момент количества движения  $\theta_{\text{вх}}$  до 5÷8. Также

возможно некоторое повышение эффективности пылеулавливания высокоэффективных циклонов СДК - ЦН - 33 и СК - ЦН - 34 до значений  $\theta_{\text{вх}} = 8 \div 10$ . Как видно из этой таблицы, большему значению коэффициента гидравлического сопротивления  $\zeta_0$  соответствует и большее значение безразмерного параметра крутки на входе в циклон  $\theta_{\text{вх}}$ , что подтверждает предположение о возможности рассмотрения эффективности пылеулавливания по параметру  $\theta_{\text{вх}}$  для расчета аналогичного циклонного тепло-массообменного и газо-пылеулавливающего оборудования [7,9].

**Таблица 3 - Расчетные значения конструктивных параметров высокопроизводительных и высокоэффективных циклонов (для  $R_{\text{вх}} = (D+a)/2$ )**

| Тип циклона           | ЦН-11            | ЦН-15 | ЦН-15У | ЦН-24 | СК-ЦН-34 | СК-ЦН-34М | СК-ЦН-40 | СК-ЦН-33 |
|-----------------------|------------------|-------|--------|-------|----------|-----------|----------|----------|
| $F_{\text{вх}}/D^2$   | 0,096            | 0,132 | 0,132  | 0,222 | 0,110    | 0,072     | 0,057    | 0,0141   |
| $F_{\text{к}}/D^2$    | 0,512            |       |        |       | 0,694    | 0,747     | 0,659    | 0,697    |
| $K_{\text{т}}$        | 0,188            | 0,258 | 0,258  | 0,433 | 0,158    | 0,096     | 0,086    | 0,202    |
| $\bar{R}_{\text{вх}}$ | $1-\bar{a}=0,74$ |       |        |       | 1,214    | 1,18      | 1,15     | 1,264    |
| $\theta_{\text{вх}}$  | 3,936            | 2,868 | 2,868  | 1,709 | 7,68     | 12,29     | 13,36    | 6,25     |
| $\zeta_0$             | 250              | 163   | 170    | 80    | 1150     | 2000      | -        | 600      |

Анализ работы циклонов типа СИОТ и ВЦНИИОТ, выполненный авторами [3,4] показал, что по степени очистки они равноценны циклону ЦН - 15 и уступают циклону ЦН - 11.

### Выводы

1. Для совершенствования аппаратного оформления существующих отечественных противоточных циклонов и разработки новых предлагается анализ конструктивных и расходных параметров осуществлять по безразмерному параметру крутки  $\theta_{\text{вх}}$ .

2. Оптимальными значениями параметра крутки, при которых не образуются интенсивные обратные токи, способствующие транспорту частиц пыли в выхлопную трубу являются значения  $\theta_{\text{вх}} = 5 \div 8$  (10).

3. При разработке новой конструкции циклона или вихревого пылеуловителя необходимо исследовать аэродинамическую структуру пылегазовой смеси.

4. На основе анализа работы противоточных циклонов на кафедре машин и аппаратов химических производств КНИТУ разработан вихревой пылегазоразделитель (ВПГР), обладающий повышенной эффективностью пылеулавливания.

### Литература

1. Газоочистное оборудование. Циклоны. Каталог. - М.: ЦИНТИХимнефтемаш, 1977. - 21с.
2. А.А. Халатов, В.К. Щукин. *Теплообмен, массообмен и гидродинамика закрученных потоков в осесимметричных каналах*. - М.: Машиностроение, 1982. - 200 с.
3. П.А. Коузов, А.Д. Мальгин, Г.М. Скрябин, *Очистка от пыли газов и воздуха в химической промышленности*. Химия, Москва, 1982. - 256 с.
4. Г.М. Алиев. *Техника пылеулавливания и очистки промышленных газов: Справочник*. Металлургия, Москва, 1986. - 544 с.
5. Справочник по пыле- и золоулавливанию / М.И. Биргер [и др.]; под ред. А.А. Русанова. - 2-е изд. М.: Энергоатомиздат, 1983. - 312 с.
6. Х.О. Нурсте, Ю.В. Иванов, Х.О. Луби, *Теплоэнергетика*, №1, 37 – 39 (1978).
7. Л.Н. Москалев, С.И. Поникаров, И.И. Поникаров, В.В. Алексеев. *Вест. Казан. технол. ун-та*, **15**, 10, 240 – 242 (2012).
8. В.В. Алексеев, И.И. Поникаров, П.В. Алексеев. *Вест. Казан. технол. ун-та*, **16**, 20, 220 – 223 (2013).
9. В.В. Алексеев, П.В. Алексеев, И.И. Поникаров. *Вест. Казан. технол. ун-та*, **16**, 21, 218 – 220 (2013).