



УДК 621.928.9

**Замалиева А.Т.** – инженер

E-mail: [Albina-0587@rambler.ru](mailto:Albina-0587@rambler.ru)

**ООО «Газпром трансгаз Казань»**

Адрес организации: 420000, Россия, г. Казань, ул. А. Кутуя, д. 41

**Зиганшин М.Г.** – доктор технических наук, доцент

E-mail: [mjihan@mail.ru](mailto:mjihhan@mail.ru)

**Потапова Л.И.** – кандидат технических наук, доцент

E-mail: [ludmilapo@mail.ru](mailto:ludmilapo@mail.ru)

**Казанский государственный архитектурно-строительный университет**

Адрес организации: 420043, Россия, г. Казань, ул. Зеленая, д. 1

### **Об эффективности существующих методов циклонной фильтрации при осаждении мелкодисперсных частиц классов $PM_{10}$ , $PM_{2,5}$**

#### **Аннотация**

*Постановка задачи.* Целью работы является усовершенствование циклонных и фильтрующих пылеуловителей посредством повышения эффективности осаждения мелкодисперсных частиц классов  $PM_{10}$ ,  $PM_{2,5}$  с одновременным снижением энергетических и материальных затрат.

*Результаты.* Проведен анализ существующих способов циклонной фильтрации производственных дисперсных выбросов. Выполнен численный эксперимент на основе методов вычислительной гидродинамики. Произведены стендовые испытания циклонного фильтра на базе серийного циклона ЦН-11-200, найдены аэродинамические характеристики его работы.

*Выводы.* Результаты испытаний циклона с фильтрующей вставкой показали повышение эффективности очистки газа при незначительном увеличении затраты энергии.

**Ключевые слова:** циклон, фильтр, сепарация, степень очистки, численное моделирование.

При современных требованиях к чистоте атмосферного воздуха одноступенчатая обработка технологических выбросов в большинстве случаев не может обеспечить необходимую степень его очистки при приемлемых энергетических показателях. В последнее время ужесточаются нормативы по содержанию в атмосферном воздухе взвешенных частиц с размерами менее 10 мкм. Соответственно возрастают требования к очистке гетерогенных газовых выбросов от высокодисперсных компонентов [1]. По данным Всемирной организации здравоохранения, взвешенные частицы размером менее 2,5 мкм ( $PM_{2,5}$ ) и менее 10 мкм ( $PM_{10}$ ), содержащиеся в атмосферном воздухе, наносят намного больший вред организму человека, чем более крупные частицы. По влиянию на здоровье населения их относят к наиболее значимым загрязнителям воздуха. Для эффективной обработки современных производственных выбросов, содержащих частицы классов  $PM_{2,5}$ ,  $PM_{10}$ , необходима многоступенчатая система очистки с очистными устройствами, оптимально учитывающими физико-химические свойства гетерогенных и гомогенных загрязнителей выброса, а также его нейтральной части [2]. В данной работе представлены результаты исследования аппарата, совмещающего ступени грубой и финишной очистки гетерогенных выбросов с частицами классов  $PM_{10}$  и  $PM_{2,5}$ .

Сообразно с известной энергетической теорией очистки гетерогенных выбросов и соответствующим ей энергетическим методом расчетов инерционных пылеулавливающих устройств, их эффективность повышается с увеличением энергозатрат на очистку. Однако при этом необходимо принимать во внимание только затраты, непосредственно связанные с задержанием взвешенных частиц. Выполненный с этой позиции анализ существующих устройств циклонной фильтрации производственных дисперсных выбросов (рис. 1) показал следующее. Устройства, обладающие высокой степенью осаждения частиц классов  $PM_{10}$  и  $PM_{2,5}$ , одновременно являются материало- и энергозатратными. Аппараты же с низким сопротивлением, и,

соответственно, энергоэффективные, имеют невысокую степень осаждения частиц указанных классов. Так, например, конструкция пылеуловителя ПУМА (рис. 1а) обеспечивает высокую производительность по воздуху, малое аэродинамическое сопротивление, низкие капитальные и эксплуатационные затраты, однако высокая степень очистки не достигается [3].

В двухступенчатом комбинированном фильтре-сепараторе (рис. 1б), предназначенном для фильтрации жидкости [4], совмещены две ступени очистки. В нем первой ступенью служит циклонная часть, состоящая из завихрителя с соплом и кольцевого цилиндрического канала, образованного корпусом фильтра и сеткой; второй ступенью – цилиндрический сетчатый фильтроэлемент, обеспечивающий высокую степень очистки. В то же время движение жидкости через него требует высоких энергетических затрат, а при касательном натекании сопротивлению еще более увеличивается.

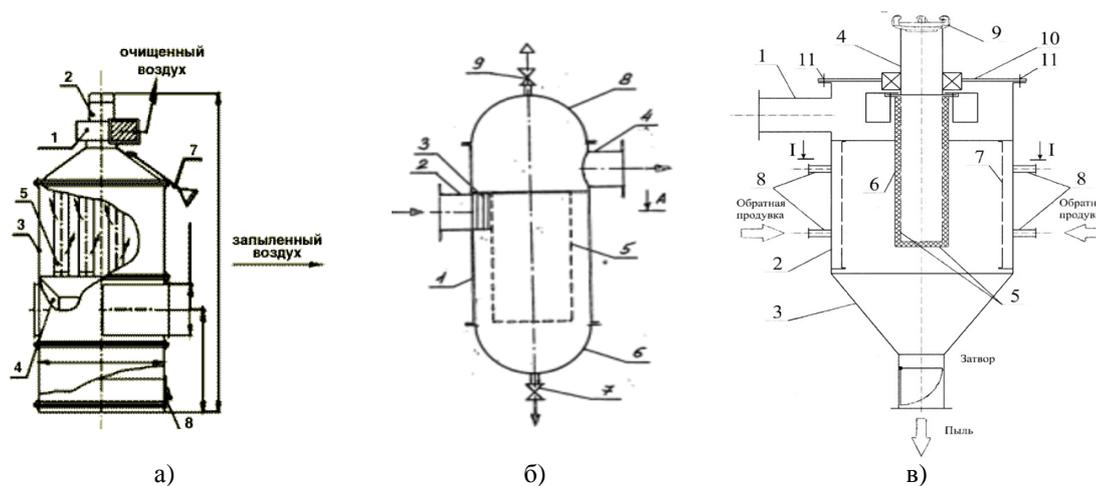


Рис. 1. Устройства для циклонной фильтрации гетерогенных выбросов:

- а – конструкция пылеуловителя ПУМА: 1 – вентилятор, 2 – электродвигатель вентилятора, 3 – корпус, 4 – сухой циклон, 5 – фильтр тонкой очистки, 6 – входной патрубок, 7 – штуцер, 8 – бункер; б – двухступенчатый комбинированный фильтр-сепаратор для фильтрации жидкости: 1 – корпус; 2 – подводящий патрубок; 3 – сопло; 4 – отводящий патрубок; 5 – сетчатый фильтроэлемент; 6 – сборник шлама; 7 – кран отвода шлама; 8 – верхняя крышка; 9 – кран отвода воздуха; в – циклон-фильтр: 1 – входной патрубок, 2 – корпус, 3 – коническое днище, 4 – штуцер отвода, 5 – цилиндрический каркас, 6 – плотный фильтровальный материал, 7 – тонкая фильтровальная ткань, 8 – продувочные штуцеры, 9 – цапфовый элемент, 10 – верхний торец, 11 – крепежные элементы разъема

Циклон-фильтр по [5] (рис. 1в) может быть использован при необходимости тонкой очистки и обеззараживания вентиляционного воздуха, подаваемого, например, в операционные отделения учреждений здравоохранения, а также для очистки производственных выбросов, в том числе загрязненных особо опасными взвесями. Техническая задача интенсификации циклонной обработки и повышения степени осаждения тонкодисперсных частиц решается здесь путем увеличения скорости дисперсного потока с одновременным принятием мер по предотвращению абразивного износа внутренних поверхностей аппарата. Устройство позволяет уменьшить ресурсоемкость, однако энергозатраты растут пропорционально увеличению скорости. Существует еще ряд конструкций фильтров-циклонов, например, разработанная авторами, конструкция со сквозной центральной трубой в оси циклона, [6], с целью снижения перепада статического давления без ухудшения степени очистки. По представлениям авторов [7], в классических стандартных циклонах без центральной направляющей трубы переход от ламинарного к турбулентному течению происходит внутри выхлопной трубы аппарата. В результате ядро вихря потока в аппарате становится нестабильным, что вызывает большие потери давления и энергозатраты. В свою очередь,

это вызывает, по [8], высокие потери (до 90 % от общей потери давления) вследствие диссипации энергии в потоке. Однако данные, приводимые авторами конструкции с центральной направляющей трубой, показывают, что опыты проводились при нагрузках в 1,5...2 раза ниже оптимальных для классических стандартных циклонов такого типа. В целом анализ отечественных и зарубежных источников последних десятилетий показал отсутствие конструкций, которые обеспечивали бы высокую (более 98 %) степень очистки взвеси класса  $PM_{2,5}$  без резкого увеличения энергозатрат на обработку выбросов.

Для достижения данного результата выполнены стендовые испытания циклона-фильтра, конструкция которого была разработана авторами на базе серийного циклона ЦН-11 диаметром 200 мм. Испытания проводились на специально приготовленном дисперсном материале – шамотной пыли с размером частиц до 63 мкм. Пробу материала для испытаний отбирали в соответствии с надлежащей лабораторной практикой по ГОСТ Р 51568-99 (ИСО 3310-1-90). Пробу получали посредством следующих стандартных операций, производимых ручным способом: тонкого дробления предварительно измельченного шамотного материала, просеивания частиц через сито с размером ячеек 0,063 мм, истирания частиц размером 0,063 мм и менее, сокращения (квартования) полученной пыли. Отобранная проба подвергалась дисперсионному анализу методом седиментации в дистиллированной воде для определения характеристик пыли (медианного диаметра частиц и дисперсии). Изменение массы, оседающего в дисперсионной жидкости, измельченного материала регистрировалось на торсионных весах ВТ-500.

Для седиментационного анализа брали из просеянной пробы количество материала, достаточное для приготовления суспензии с объемной долей взвеси до 0,5... 1 %. В дальнейшем по результатам опытных замеров на основании закона Стокса получали размеры частиц:

$$r = \sqrt{\frac{9\eta H}{2(\rho_p - \rho_L)g\tau}}, \quad (1)$$

где  $H$  – высота оседания частиц,  $\tau$  – время оседания,  $n=H/\tau$  – скорость оседания,  $r$  – радиус частиц,  $\rho_p$  – плотность частиц,  $\rho_L$ ,  $\eta$  – плотность и вязкость дисперсионной среды.

Радиус частиц по результатам седиментационного анализа (табл. 1) по фракциям получились от 1,23 мкм до 31,51 мкм; следовательно, наибольший диаметр частиц пыли по результатам седиментационного анализа равен 63 мкм.

Таблица 1

## Результаты седиментационного анализа

№ фракции	Время осаждения, с		Радиус фракции, мкм		$\Delta r$ , мкм	$P_i$ , %	$\Delta m/\Delta r$ , $10^5$ мг/м	$\Delta P$ , %
	$\tau_{\min}$	$\tau_{\max}$	$r_{\min}$	$r_{\max}$				
1	10	30	31,51	18,19	13,32	34,78	9,01	17,39
2	30	60	18,19	12,86	5,33	52,17	11,26	8,70
3	60	120	12,86	9,09	3,77	60,87	15,93	8,70
4	120	240	9,09	6,43	2,66	69,57	22,52	8,70
5	240	360	6,43	5,25	1,18	78,26	42,37	7,25
6	360	600	5,25	4,07	1,18	85,51	42,37	4,35
7	600	1200	4,07	2,88	1,19	89,86	25,18	4,35
8	1200	2400	2,88	2,03	0,84	94,20	25,18	2,90
9	2400	6600	2,03	1,23	0,81	97,10	24,77	2,90

Схема экспериментального стенда для испытания циклона-фильтра приведена на рис. 2. Запыленный воздух протягивается через циклон – 7 вентилятором – 14. Шамотная пыль в порошкообразном состоянии через измерительный коллектор – 1 подается из пылепитателя в воздуховод – 2 диаметром 140 мм. Входная скорость в циклон замерялась до запыления термоанемометром – 19 (модель Testo 425), установленным в круглый порт доступа – 4. Запыленный поток проходит по воздуховоду во входной патрубке – 6 циклона – 7 и попадает в кольцевое пространство внутри него между корпусом и выхлопной трубой – 8. При таком движении потока ряд частиц вследствие инерционности сходит с криволинейных линий тока, соударяется со стенкой циклона – 7

и сползает в бункер – 17 с герметичным затвором – 16. Наиболее мелкие фракции пыли задерживаются тканевым фильтром – 13, где происходит осаждение пыли среднего и мелкого размера по касательному и инерционному механизмам. Далее поток совершает движение вниз по винтовой траектории, разворачивается перед бункером вверх и выходит по восходящей винтовой траектории через выхлопную трубу – 8.

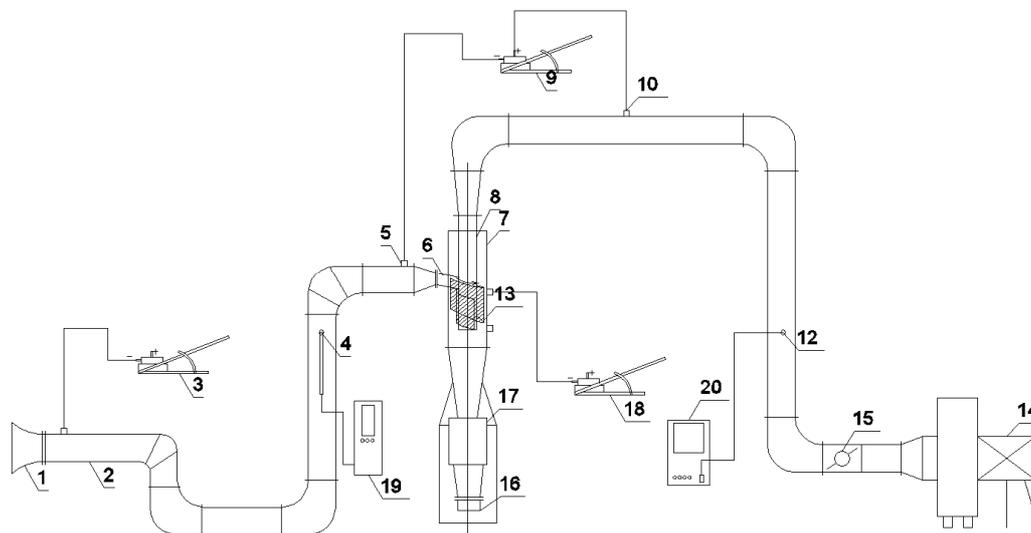


Рис. 2. Экспериментальный стенд для испытания серийного циклона ЦН-11

Расход воздуха на входе в циклон замерялся при помощи коллектора – 1 с внутренним диаметром 140 мм и микроанометра – 3. Регулировка расходов воздуха в сети выполнялась дроссель-клапаном – 15 на пяти режимах. Для нахождения сопротивления циклона замеряли перепад давления  $\Delta P$  микроанометром – 9 в точках 5 и 10.

В порт доступа круглого сечения 12 устанавливали импактор 20 для определения дисперсного состава пыли после циклона-фильтра.

Запыленный поток, поступая в центральное сопло первого диска, приобретает определенную скорость и после выхода из сопла изменяет свое направление на  $90^\circ$ , чтобы попасть в периферийные сопла второго диска. При этом наиболее крупные частички пыли под действием инерционных сил попадают на поверхность смазки в выемке второго диска и оседают на ней. Более мелкие и, соответственно, менее инерционные частицы, уносятся с потоком газов и проходят через сопла второго диска. Суммарное сечение этих сопел равно сечению сопла первого диска. Поэтому скорость газового потока на выходе из сопел второго диска будет такой же, и в выемке третьего диска осадут частицы пыли того же размера, которые не осели на смазке в выемке второго диска. Следующее сопло, через которое проходит газовый поток, имеет меньший диаметр, т.е. скорость истечения будет несколько больше, и на подложке в соответствующей выемке осадут частицы меньшего размера, чем на предшествующих двух дисках. Таким образом, на каждой паре последовательно установленных дисков будет осажаться определенная фракция пыли. Размер фракций пыли, осаждающейся в каждой ступени импактора, образуемой соответствующей парой дисков, определяется предварительной тарировкой и указан в паспорте импактора по ТИ 34-70-037-83.

Результаты анализа дисперсного состава потока приведены в табл. 2, по которому можно сделать вывод, что среднегеометрический размер частиц  $d_{50} = 1,6$  мкм.

Таблица 2

#### Фракционный состав пыли

Размер фракции, мкм	> 0,4	> 0,8	> 1,6	> 3,5	> 6,0	> 10
Массовая доля фракции, %	80	70	50,0	30	10	5

По суммарному привесу шайб и фильтра импактора можно определить запыленность газового потока по формуле:

$$Z_r = \frac{\sum g'}{Q \cdot T \cdot 10^{-3}}, \quad (2)$$

где  $Z_r$  – запыленность газов, мг/м<sup>3</sup> (при нормальных условиях);  $\sum g^i$  – суммарный привес шайб и фильтра импактора, мг.

$$Z_r = \frac{26}{0,249 \cdot 10^{-3} \cdot 260} = 401,61 \text{ мг/м}^3.$$

Образцы фильтровального материала взвешивались в начале и конце испытания. После окончания испытания с начальной, средней и конечной частей фильтровальной ткани вырезались образцы для сравнительного определения эффективности осаждения по счетной концентрации уловленных частиц, которая устанавливалась в результате изучения образцов под микроскопом МИН-8 с 400-кратным увеличением. Образец тканевого фильтра представлен на рис. 4. На нем отчетливо видны осевшие крупинки пыли размером до 1 мкм. Это позволило провести определение счетного количества частиц классов PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub>, что необходимо для достоверного сопоставления интенсивности их оседания из потока на фильтр при различных режимах.

Для регистрации изображения с помощью оптического микроскопа необходимо дальнейшее увеличение построенного им изображения при не слишком высоком увеличении объектива. Для этого есть три возможности. Первая состоит в использовании окуляра и дополнительных линз, помещаемых между объективом и окуляром. Вторая – в фокусировке изображения на светочувствительную фотопленку и его последующем фотоувеличении. Третий способ – это сканирование изображения и демонстрация его на мониторе. В последние годы достигнут значительный прогресс в развитии высококачественных ПЗС-матриц (сокр. от «прибор с зарядовой связью»), называемых в оптике так же ССD-камерами (сокр. от англ. «Charge-Coupled Device»), позволяющих создавать цифровое изображение. При этом отпадает необходимость в дополнительных линзах. В настоящее время этот способ записи изображения продолжает интенсивно развиваться [9].

В данной работе лабораторный микроскоп МИН-8 был использован совместно с дополнительным освещением для изучения непрозрачных объектов в отраженном свете. На наклонную насадку микроскопа устанавливалась цифровая камера фотоаппарата (разрешение камеры 12 мегапикселей; объектив с диафрагмой F/1,8 поглощает на 50 % больше света для увеличения контрастности и улучшения качества снимков в условиях плохой освещенности), после чего добивались фокусировки микроскопом. Для создания четкого изображения запыленной поверхности фильтра была организована дополнительная подсветка к обычному освещению предметного столика (лампой накаливания справа и сверху), а также к общему освещению комнаты люминесцентными лампами и солнечным светом из окна.

При микроскопии осажденных на поверхности фильтра частиц шамота (рис. 3), отличающихся от окружающей среды только по показателю преломления, изменения интенсивности света (амплитуды) не происходит, а изменяется только фаза световых волн, и наблюдаемые объекты выглядят мало контрастными, что и позволило провести определение счетного количества осажденных частиц шамота на поверхности фильтра.



Рис. 3. Запыление поверхности фильтрующей вставки по результатам эксперимента при полном открытии дроссель-клапана

Таким образом, проведенные опытные исследования показали целесообразность конструктивного дополнения возвратно-поточных циклонов фильтрующей вставкой в зоне, где происходит инерционное осаждение пыли. Вместе с тем, с целью доработки конструкции ряд исследований выполнен на базе расчетных методов. Для определения эффективности отделения взвешенной части потока в данном циклоне-фильтре был использован безразмерный комплекс  $Re_r$ , полученный из дифференциальных уравнений, описывающих движение частицы и вращающегося потока [10]:

$$Re_r = \frac{U_0 \cdot \rho_p^2 \cdot D_p^4}{c \cdot \rho_g \cdot R_2^3 \cdot \eta}, \quad (3)$$

где  $U_0$  – начальная скорость, м/с,  $\rho_p$  – плотность частиц, кг/м<sup>3</sup>,  $D_p$  – диаметр микрочастиц, м,  $c$  – коэффициент, зависящий от завихряющегося устройства,  $\rho_g$  – плотность газа, кг/м<sup>3</sup>,  $R_2$  – радиус циклона, м,  $\eta$  – коэффициент динамической вязкости, Па·с.

Численное значение  $Re_r$  по (3) в окончательном виде – это энергетическая характеристика эффективности выделения взвешенной частицы с определенными инерционными параметрами из потока, создаваемого циклоном с данными конструктивными характеристиками. Это позволяет определять по значениям  $Re_r$  фракционную степень инерционной сепарации частиц из потока при существующих энергозатратах [10].

Результаты расчетов относительного числа Рейнольдса  $Re_r$  на основе ЦН-11-200 в соответствии с рабочими условиями для размеров частиц  $D_p = (1...100) \times 10^{-6}$  м при относительной скорости потока на входе в циклон  $U_0 = 1,0...14,0$  м/с представлены на рис. 4 и в табл. 3.

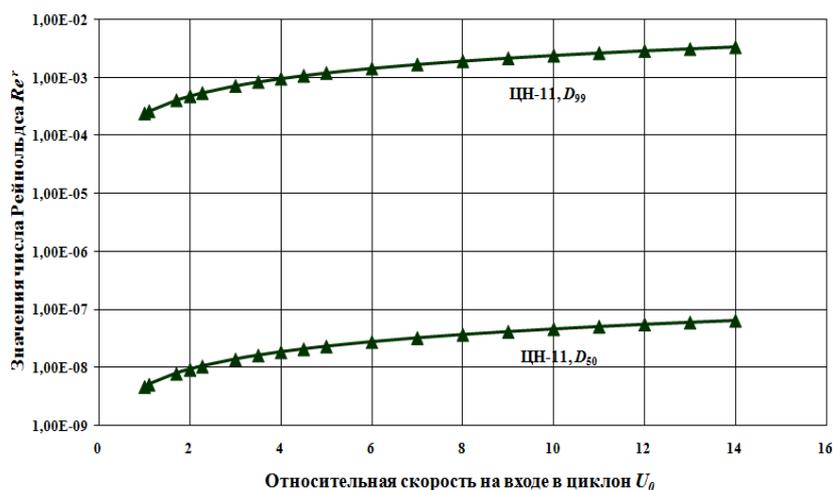


Рис. 4. Зависимость относительного числа Рейнольдса  $Re_r$  для циклона с радиусом  $R=0,1$  м от относительной скорости потока на входе в циклон  $U_0$ , м/с

Таблица 3

**Зависимость числа  $Re_r$  от скорости потока на входе в циклон для частиц, оседающих на 50 % и 99 % в кольцевом сечении модели циклона ЦН-11-200 диаметром 200 мм**

Степень сепарации частиц *, %	Критические числа $Re_r$ , при скорости потока на входе в циклон $U_0$ , м/с				
	1,0	5,0	7,0	10,0	14,0
50	$4,67 \cdot 10^{-9}$	$2,33 \cdot 10^{-8}$	$3,27 \cdot 10^{-8}$	$4,67 \cdot 10^{-8}$	$6,54 \cdot 10^{-8}$
99	$2,41 \cdot 10^{-4}$	$1,20 \cdot 10^{-3}$	$1,68 \cdot 10^{-3}$	$2,41 \cdot 10^{-3}$	$3,37 \cdot 10^{-3}$
* Размеры частиц, оседаемых в циклоне ЦН-11-200 на 50 % ( $D_{50}$ , по паспортным данным) и на 99 % ( $D_{99}$ ), равны соответственно $3,65 \cdot 10^{-6}$ м и $55,0 \cdot 10^{-6}$ м.					

Расчеты показали, что степеням осаждения частиц в циклоне соответствуют строго определенные значения чисел  $Re_r$ . Так, степени осаждения 99 % при скорости 5,0 м/с может быть сопоставлено число  $Re_r = 1,2 \cdot 10^{-3}$ , а степени осаждения 50 %  $Re_r = 2,33 \cdot 10^{-8}$ .

Проведенные исследования показывают, что параметр  $Re_c$  позволяет находить численные значения параметров очистки в сепараторах с вращательным движением многофазных потоков расчетным путем. Расчеты на основе  $Re_c$  приводят к результатам, близким к опытным. Поэтому значение числа  $Re_c$  для них может рассматриваться как критериальный параметр.

Также было выполнено численное моделирование аэродинамических параметров работы циклона-фильтра на основе методов вычислительной гидродинамики. При этом виртуальное запыление в численном эксперименте не проводилось, поскольку эффективность осаждения точнее и легче определяется через критериальный параметр осаждения  $Re_c$ . Необходимость численного исследования в том, что проведение подобного натурального эксперимента с непосредственным наблюдением всех характеристик потока, которые возможно идентифицировать в численной 3d-модели, чрезвычайно затруднительно. И поскольку (как было показано на натурном эксперименте) наличие фильтрующей вставки не нарушает интенсивности крутки, то вопросы, связанные с характеристиками потока (распределения скорости и давлений) в пределах кольцевого пространства, можно исследовать численно без моделирования фильтрующей вставки.

На рис. 5 представлены эпюры скорости и давления в продольном сечении модели при скорости 5,0 м/с и показаны расположения поперечных сечений.

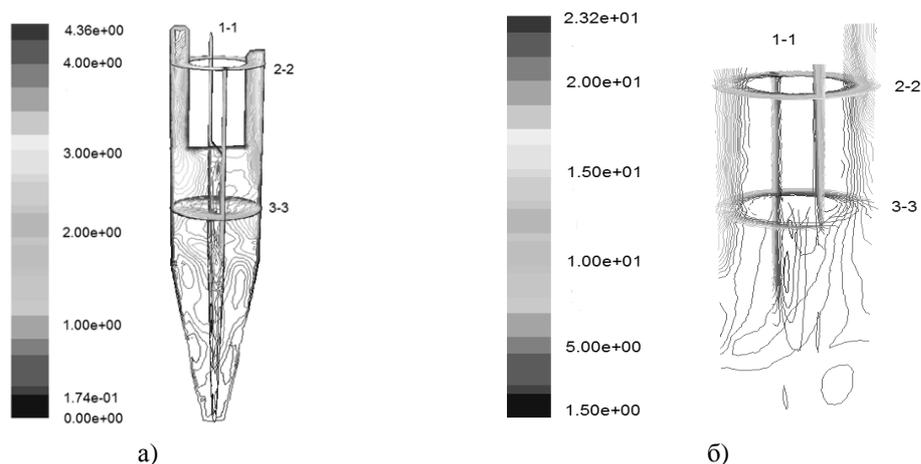


Рис. 5. Распределение скорости потока (а) и давления (б), в пределах кольцевой зоны в продольном сечении циклона 1-1, 2-2 – поперечное сечение на входе циклона; 3-3 – поперечное сечение на выходе потока из кольцевой зоны циклона

Энергетические параметры вращающегося потока соизмеримы с величиной его энергии на входе в аппарат. В таких условиях для описания процесса сепарации целесообразно использовать систему из осредненного уравнения Навье-Стокса для движения однофазного потока и уравнения движения частиц, основанного на законе Ньютона. Для обеспечения замкнутости системы в уравнениях переноса и потери (диссипации) кинетической энергии использована модель вязкости Спаларта-Аллмараса [11, 12]. После тангенциального входа поток газа приобретает в корпусе циклона осесимметричное винтовое движение вниз. После кольцевой зоны вертикальная составляющая скорости потока вблизи стенки корпуса при перемещении вниз начинает уменьшаться из-за роста давления в сужающейся конической части циклона.

Как было отмечено выше, полезные величины энергетических затрат должны быть непосредственно связаны с улавливанием взвешенных частиц. В данной конструкции это процессы осаждения на поверхностях фильтровальной вставки и внутренней стенки циклона. Потери энергии на сопротивления, возникающие при тангенциальном входе в циклон запыленного потока и при его движении в соединительных фасонных деталях до циклона, таковыми не являются, но они неизбежны в процессе эксплуатации аппарата.

Для дальнейшего совершенствования в этом отношении циклона-фильтра могут использоваться рекомендации по снижению сопротивления в канале с боковым отверстием [13], полученные на основе компьютерного моделирования течений методами вычислительной гидродинамики.

Предлагаемая конструкция циклона-фильтра позволяет достичь увеличения пропускной способности очистных аппаратов при повышении качества очистки газа, которое выражается в уменьшении размера частиц, улавливаемых на 50 % (диаметра отсекаания), со средних для циклонов значений 5-10 мкм до 0,5 мкм. Указанное улучшение качества очистки не требует существенного увеличения затраты энергии. Это является одним из преимуществ перед обычными циклонами, у которых для снижения диаметра отсекаания на 0,1 мкм (начиная с 2-3 мкм) требуется увеличивать затраты энергии до 15 %.

### Список библиографических ссылок

1. Октябрьский М. Л. Оборудование для очистки воздушной среды рабочей зоны // Актуальные проблемы лесного комплекса. 2016. № 16. С. 14–18.
2. Зиганшин М. Г., Колесник А. А., Зиганшин А. М. Проектирование аппаратов пылегазоочистки: учебное пособие. СПб. : Лань, 2014. 544 с.
3. Техническая информация по пылеулавливающим агрегатам серии ПУМА. 2017. URL: <http://www.st-vent.ru/index.php/filter-pyleulovitel/filter-abraziv/filter-puma> (дата обращения: 27.10.2017).
4. Валиулин С. С., Курников А. С. Моделирование гидродинамических процессов в циклонной части фильтра-сепаратора // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. 2011. № 3. С. 72–77.
5. Циклон-фильтр : пат. 2361678 Рос. Федерация. № 2008110843/15; заявл. 14.03.2008 ; опубл. 20.07.2009, Бюл. № 20. 5 с.
6. Staudinger G. Zyklone mit zentralkörpern // Veröffentlichung in Chem. Ing. Tech. 1992. № 64. P. 769–888.
7. Bielefeldt E. A. Wirbelkammern neuerer technologie. Bericht : Neue Patentanmeldung Wirbeltrennverfahren, 2013. 286 p.
8. Muschelknautz E. Theorie der fliehkraftabscheider mit besonderer berücksichtigung hoher temperaturen und drücke // VDI-Bericht Nr. 1980. № 363. P. 49–60.
9. Брандон Д., Каплан У. Микроструктура материалов. Методы исследования и контроля. М. : Техносфера, 2006. 384 с.
10. Зиганшин М. Г., Зиганшин А. М. Лабораторно-практический курс пылегазоочистки. Часть 1. Казань : КГАСУ, 2012. 188 с.
11. Зиганшин М. Г. Системы очистки выбросов ТЭС. Часть 1. Оценки эффективности, теоретические основы и критерии оценки. Казань : КГЭУ, 2013. 252 с.
12. Зиганшин М. Г. Системы очистки выбросов ТЭС. Часть 2. Казань : КГЭУ, 2013. 212 с.
13. Зиганшин А. М., Гимадиева Г. А., Батрова К. Э. Численное исследование истечения из бокового последнего и среднего отверстий: сб. статей I Всероссийской научно-технической конференции, посвящённой памяти д-ра техн. наук, профессора, А. А. Сандера / НГАСУ. Новосибирск, 2017. С. 103–111.

**Zamaliyeva A.T.** – engineer

E-mail: [Albina-0587@rambler.ru](mailto:Albina-0587@rambler.ru)

**LTD Gazprom transgaz Kazan**

The organization Address: 420000, Russia, Kazan, A. Kutuya st., 41

**Ziganshin M.G.** – doctor of technical sciences, associate professor

E-mail: [mjihan@mail.ru](mailto:mjihhan@mail.ru)

**Potapova L.I.** – candidate of technical sciences, associate professor

E-mail: [ludmilapo@mail.ru](mailto:ludmilapo@mail.ru)

**Kazan State University of Architecture and Engineering**

The organization Address: 420043, Russia, Kazan, Zelyonaya st., 1

## The analysis of efficiency of use of a cyclonic filtration for sedimentation of fine particles

### Abstract

*Problem statement.* The purpose of work is the improvement of the cyclonic and filtering dust collectors by means of increase in efficiency of sedimentation of fine particles of the classes PM<sub>10</sub>, PM<sub>2,5</sub> with simultaneous decrease in power and material inputs.

*Results.* The analysis of the existing ways of cyclonic filtration of production disperse emissions is carried out. Experiments on the serial TsN-11-200 cyclone in vitro are executed, aerodynamic characteristics of his work on various modes of cleaning are found. The numerical experiment on the basis of methods of computing hydrodynamics is made.

*Conclusions.* The received results specify that addition in the form of the filtering insert leads to increase in efficiency of purification of gas, at the same time doesn't demand additional expense of energy.

**Keywords:** cyclone, filter, separation, extent of cleaning, numerical modeling.

### References

1. Octabr'skiy M. L. Equipment for cleaning of the air environment of a working zone // Aktual'nyye problemy lesnogo kompleksa. 2016. № 16. P. 14–18.
2. Ziganshin M. G., Kolesnik A. A., Ziganshin A. M. Design of devices of a dusting: manual. SPb.: Lan', 2014. 544 p.
3. Technical information on dust removal units of the PUMA series. 2017. URL: <http://www.st-vent.ru/index.php/filter-pyleulovitel/filter-abraziv/filter-puma> (reference date: 27.10.2017).
4. Valiulin S. S., Kournikov A. C. Modeling of hydrodynamic processes in a cyclonic part of the filter separator // Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Morskaya tekhnika i tekhnologiya. 2011. № 3. P. 72–77.
5. Cyclone filter: patent 2361678 of the Rus. Federation. №. 2008110843/15 ; decl. 3.14.2008 ; publ. 7.20.2009, Bull. № 20. 5 p.
6. Staudinger G. Zyklone mit zentralkörpern // Veröffentlichung in Chem. Ing. Tech. 1992. № 64. P. 769–888.
7. Bielefeldt E. A. Wirbelkammern neuerer technologie. Bericht : Neue Patentanmeldung Wirbeltrennverfahren, 2013. 286 p.
8. Muschelknautz E. Theorie der fliehkraftabscheider mit besonderer berücksichtigung hoher temperaturen und drücke // VDI-Bericht Nr. 1980. № 363. P. 49–60.
9. Brandon D., Kaplan U. Mikrostruktura of materials. Methods of a research and M.'s control : Technosphere, 2006. 384 p.
10. Ziganshin M. G., Ziganshin A. M. Laboratory course of a dusting. Part 1. Kazan : KGASU, 2012. 188 p.
11. Ziganshin M. G. Systems of cleaning of emissions of thermal power plant. Part 1. Kazan : KGEU, 2013. 252 p.
12. Ziganshin M. G. Systems of cleaning of emissions of thermal power plant. Part 2. Kazan : KGEU, 2013. 212 p.
13. Ziganshin A. M., Gimadiyeva G. A., Batrova K. E. A numerical research of the expiration from side last and average openings: dig. of art. I of the All-Russian scientific and technical conference devoted to memory of the Dr. Sci. Tech., professor, A.A. Sandera / NGASU. Novosibirsk, 2017. P. 103–111.