

УДК 69.057; 658.382.3

**Садрtdинов И.К.** – директор

E-mail: [tatkomen1@yandex.ru](mailto:tatkomen1@yandex.ru)

**Республиканское производственное объединение «ТАТКОММУНЭНЕРГО»**

**Мусаев А.М.** – кандидат технических наук, доцент

**Сафиуллин Р.Г.** – кандидат технических наук, доцент

**Казанский государственный архитектурно-строительный университет**

## ПУТИ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ПРОЦЕССОВ И ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ПОТОКОВ В ГАЗООЧИСТНЫХ И ВЕНТИЛЯЦИОННЫХ СООРУЖЕНИЯХ

### АННОТАЦИЯ

Рассматривается конструкция многоступенчатого «модульного комплекса» для пылегазозолоулавливания из дымовых и агрессивных газов. Высокие центробежные ускорения в сочетании с селективными адсорбентами обеспечивают полноту улавливания пыли, золы и нейтрализации газов. В основе модулей лежит использование высокоскоростных закрученных потоков, создаваемых тангенциальными гидродинамическими ускорителями (ГДУ). Приводится методика расчета ГДУ, оснащенных насадками Лаваля, и габаритов «модульных» секций.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** модуль, сепараторы, циклоны, центрифуги, пылегазозолоулавливание, парниковые газы, диоксиды, атмосферный воздух, экология.

**Sadrtdinov I.K.** – director

**RPO «TATKOMMUNENERGO»**

**Musaev A.M.** – candidate of technical sciences, associate professor

**Safiullin R.G.** – candidate of technical sciences, associate professor

**Kazan State University of Architecture and Engineering**

## THE WAYS OF INTENSIFICATION OF PROCESSES AND ECONOMIC EXPEDIENCY OF USING A HIGH-SPEED FLOW IN A GAS CLEANING APPARATUS AND VENTILATION

### ABSTRACT

The design of a multistage «modular complex» for catching the dust out the corrosive gases is considered. High centrifugal acceleration in a combination with selective adsorbents provides a completeness of catching of a dust, ashes and neutralization of gases. In a basis of modules the using of the high-speed twirled flows created by hydrodynamic accelerators (HDA) lays. The method of calculating the HDA, equipped with a Laval nozzle, is given and dimensions of «modular» sections is resulted.

**KEYWORDS:** module, separator, cyclones, centrifuge, smog and gas cleaning, aggressive gases, dioxides, atmospheric air, ecology.

В последние десятилетия особенно ярко проявились природные катаклизмы, связанные с изменением климата. Споры ученых о том, какие факторы влияют на глобальное потепление, пока не имеют достаточных обоснований. Тем не менее, никто не может отрицать разрушительное влияние человеческой деятельности. Этому сопутствуют проблемы, связанные с постоянно возрастающей мощностью теплогенерирующих агрегатов, автотранспорта, космических программ и варварской эксплуатацией водных и лесных ресурсов.

Более 60 % добываемых топливных ресурсов используется промышленностью и теплогенерирующими агрегатами. При этом процессы сжигания не достаточно организованы. В большинстве случаев при сжигании органического топлива используется пламень диффузного типа – с целью исключения возможности проскока пламени и взрывов. Топливо часто подается частично перемешанным с воздухом, и последующее его горение происходит одновременно с подмешиванием воздуха, не всегда обеспечивающим полноту сгорания углеводородов. При этом возникает проблема очистки больших объемов продуктов сгорания не только от различных взвесей, но и от продуктов неполного сгорания парниковых двухатомных газов.

Многие производственные процессы и средства для очистки газов формируются на основе «модульного принципа», использующего схемы безотходного производства, стандартизированного пылегазоулавливающего оборудования и систем вентиляции. Одним из таких современных «модулей» можно считать комплекс «печь Ванюкова» [1], сочетающий сжигание ТБО с пылегазоулавливанием, в схему которого включены: котел-утилизатор, серия циклонов, сухой электрофильтр, дымосос, скруббер, мокрый электрофильтр и вытяжная труба. Вся эта система очистки дымовых газов занимает практически 2/3 объема самого производства и его стоимости. Недостатками такого «модульного комплекса», собранного из разнородного очистного оборудования, являются большие габаритные размеры устройств, их низкая индивидуальная производительность и малые скорости газовых потоков в аппаратах, ограничивающие их возможности при необходимости очистки больших объемов дымовых и агрессивных газов.

Основным в указанном комплексе аппаратов для очистки газов является процесс сухой сепарации частиц в циклонах, которые начали разрабатываться с 1885 года и практически не изменили своего облика и принципа работы [2]. Центробежная сила, воздействующая на частицу, определяет равновесное положение частицы в потоке и ее сепарацию:

$$F_{ц} = c_1 d_q^3 (\rho_q - \rho_g) \omega^2 / r, \quad (1)$$

где  $c_1$  – постоянная;  $d_q$  – диаметр частицы;  $\rho_q$  и  $\rho_g$  – плотности частицы и среды (газа);  $\omega$  – окружная скорость частицы;  $r$  – радиус ее вращения.

Из формулы, в частности, следует, что большие центробежные силы и, соответственно, высокая эффективность процесса сепарации достижимы при высокой окружной скорости частиц. Однако следует отметить, что увеличение скорости вращения в циклонах не дает желаемого эффекта ввиду того, что увеличивается кинетическая энергия турбулентности, которая усиливает процесс обратного перемешивания отсепарированного пылевого потока с выходящим из аппарата «чистым» газом [2]. Кроме того, при больших скоростях входа большая часть пыли выпадает на относительно коротком расстоянии от входного патрубка, где она в большом количестве накапливается на цилиндрической стенке циклона и увеличивает его сопротивление, которое достигает 2.0ч2.5 кПа. Поэтому рабочее значение скорости на входе в циклон ограничивают 16ч30 м/с в зависимости от его диаметра.

В представленной статье рассматриваются принципы конструирования эффективных модульных аппаратов, максимально использующих центробежную силу для улучшения характеристик пылезологазоочистного оборудования. Основные задачи, которые возникают при проектировании таких «модулей», – увеличение скорости вращения и времени пребывания загрязненного потока внутри аппарата.

Подобные задачи сегодня успешно решаются в циклонных прокалочных камерах, в которых термообработке подвергаются дисперсные материалы. Скорость потока на входе в камеры достигает 30ч190 м/с при значениях числа Рейнольдса  $Re = (2ч4)Ч10^5$  [3]. Значительно более высокие центробежные ускорения достигаются в центрифугах – машинах, в которых осуществляется разделение неоднородных систем в высокоинтенсивном центробежном поле [4], превышающем по ускорению естественное осаждение частиц пыли в десятки тысяч раз. Например, в газовых центрифугах для разделения изотопов вследствие высокой скорости вращения ротора линейная скорость на периферии может превышать 600 м/с. При этом продукт концентрируется у стенки камеры под большим давлением, а у оси ротора образуется так называемое «вакуумное ядро» (В.Я.), обеспечивающее дополнительную осевую циркуляцию газа внутри ротора.

Однако указанные устройства весьма сложны конструктивно и имеют высокую стоимость. Так, основным рабочим элементом в центрифуге является быстро вращающийся вокруг оси пустотелый ротор, отделочные покрытия, термообработка и точность исполнения которого принимаются по авиационным стандартам. Высоко качество исполнения и стоимость целого ряда вспомогательных устройств, таких как: опоры ротора, магнитные подшипники, двигатели и др. Каждое из этих устройств уникально. Согласованность работы узлов центрифуги требует тонкой настройки и высококвалифицированного обслуживания. Отмеченные особенности практически исключают использование центрифуг для процессов сепарирования взвеси из дымовых и агрессивных газов, однако способ достижения создаваемых ими мощных центробежных полей остается перспективной задачей для исследований и конструктивных разработок.

В предлагаемом «модуле центрифугирования» с целью сохранения перечисленных выше положительных качеств центрифуги решено использовать неподвижный корпус – цилиндр с вырезанным сектором в 90°. Цилиндрический корпус устанавливается на боковые листы бункера на уровне, отстоящем на 20° ниже горизонтальной оси корпуса. С правой стороны боковой лист приваривается заподлицо, а с левой – внахлестку к корпусу. В этом случае на левой стороне над бункером нависает часть корпуса в виде направляющего обтекаемого потоком «крыла» (см. рис. 1 и 2). При центрифугировании газовых потоков «крыло» направляет осажденные на стенках корпуса шлам и капельную жидкость в бункеры.

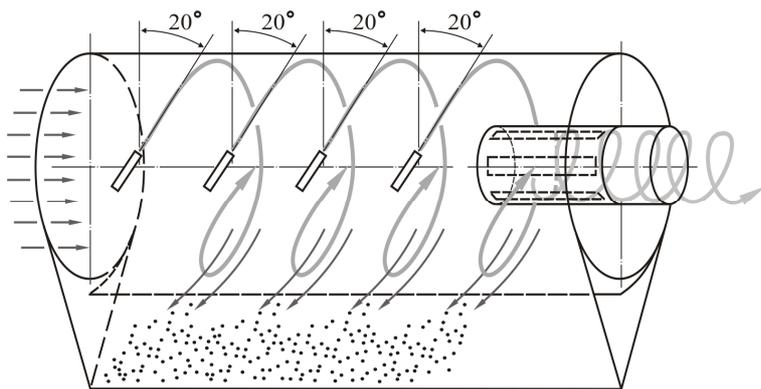


Рис. 1. Схема выделения взвеси центрифугированием газа в неподвижном корпусе при использовании высокоскоростных гидродинамических струй

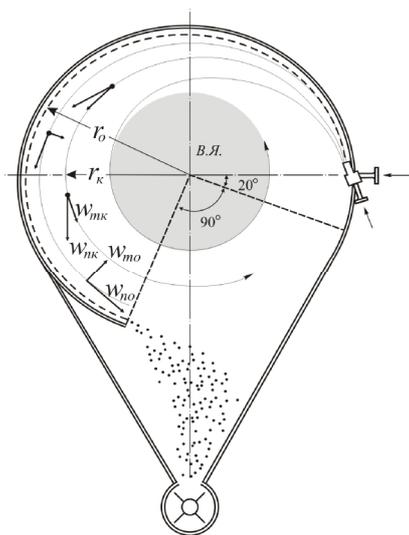


Рис. 2. Схема ввода высокоскоростной струи в неподвижный корпус центрифуги

Процесс центрифугирования дымовых и агрессивных газов в предлагаемом устройстве осуществляется за счет нагнетания гидродинамических высокоскоростных струй, направленных тангенциально внутрь неподвижного корпуса и спутно потокам очищаемых газов [5]. Для обеспечения линейного перемещения потока газов и образования «вакуумного ядра» по оси корпуса, гидродинамические струи подаются с наклоном в 20°-22° к вертикальной плоскости по ходу движения основных потоков внутри корпуса. Спиральное движение струи позволяет постоянно сбрасывать уплотненные шламы с внутренней полости неподвижного корпуса в бункеры, не перемещая их по всему корпусу, как в типовых центрифугах.

Закономерности гидродинамических процессов, происходящих в цилиндрическом корпусе «модуля центрифугирования», можно рассматривать в аналогии с циклонными прокалочными камерами, работающими при значительных скоростях потоков [3]. Схема движения потоков в корпусе предлагаемого «модуля» показана на рис. 2.

Объем потока газа, проходящего через поперечное сечение корпуса, может быть определен из уравнения:

$$V_2 = 2\pi r_o w_{mo} L = 2\pi r_k w_{mk} L_6, \tag{2}$$

где  $r_o$  – радиус корпуса;  $L_6$  – длина активного витка газового вихря;  $r_k$  – текущий радиус;  $w_{mk} = w_{mo} r_o / r_k$  – радиальная скорость потока.

Результирующий вектор скорости смещается относительно вектора окружной скорости на угол  $\alpha$ , что обуславливает перемещение потока газа к оси, а частиц пыли и капель конденсата – к периферии камеры:

$$\operatorname{tg}\alpha = w_{mk} / w_{nk} = w_{mo} / w_{no}, \tag{3}$$

где  $w_{nk} = w_{no} r_o / r_k$  – окружная скорость вихревого движения.

Условия движения частицы по круговой траектории описываются уравнением, которое отражает равенство силы давления газа на частицу и центробежной силы, действующей на нее:

$$\psi \frac{\pi d_q^2}{4} \frac{w_{mk}^2}{2} \rho_z = \frac{\pi d_q^3}{6} \frac{w_{mk}^2}{r_k} \rho_q, \quad (4)$$

где  $\psi = 24v_q / d_q w_{mk} \rho_z$ , а физические свойства газа принимаются при усредненной температуре потока.

Потери напора при входе потока в аппарат оцениваются по формуле

$$\Delta P_1 = \frac{\rho_z}{2} \left( \frac{V_z}{\mu F_0} \right)^2, \quad (5)$$

где  $\mu = 0.85$  – коэффициент расхода;  $F_0$  – наименьшее поперечное сечение сопла Лавалья.

Потери напора при образовании вихря могут быть рассчитаны по формуле

$$\Delta P_2 = \frac{\rho_z}{2} \left[ \left( \frac{D_0}{d_1} \right)^2 - 1 \right] w_{no}^2, \quad (6)$$

где  $D_0$  – диаметр цилиндрического корпуса;  $d_1$  – диаметр выходного патрубка сепаратора.

Из выражений (5) и (6) следует, что основное гидродинамическое сопротивление сосредоточено в неподвижной камере, поэтому можно принять предлагаемую в работе [6] упрощенную формулу, справедливую для области  $Re = (24) \cdot 10^5$  (при скорости воздуха на входе в камеру в диапазоне 30ч190 м/с):

$$\Sigma \Delta P = 0.07 \left( \frac{\Sigma F_0}{F_k} \right), \quad (7)$$

где  $\Sigma F_0$  – суммарная площадь отверстий для выхода высокоскоростных струй сжатого воздуха;  $F_k$  – площадь поперечного сечения камеры.

Ведущая роль в процессе центрифугирования в рассматриваемом «модуле» отводится гидродинамическим ускорителям (ГДУ) с соплами Лавалья, в которых скорость истечения сжатого воздуха превышает число Маха ( $M > 1$ ). Угол раскрытия факела струи в открытой атмосфере составляет  $21^\circ \text{ч} 23^\circ$ , а в стесненных условиях корпуса установки достигает  $50^\circ$ . Скорость истечения сжатого воздуха из сопла Лавалья гидродинамического ускорителя можно определить по формуле для адиабатического истечения [7]:

$$\omega_1 = \varphi \sqrt{2g \cdot \frac{k}{k-1} \cdot \frac{P_1}{\gamma_z} \left[ 1 - \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]}, \text{ м/с}, \quad (8)$$

где  $\gamma_z$  – удельный вес газа перед соплом при давлении  $P_1$ , кг/м<sup>3</sup>;  $\varphi$  – коэффициент истечения (для сопла с цилиндрической частью и углом  $\beta = 45^\circ$  при  $l/d = 0.18$   $\varphi = 0.75$ , при  $l/d = 0.56$   $\varphi = 0.9$ );  $k$  – показатель адиабаты (для двухатомных газов и воздуха  $k=1.4$ );  $g$  – ускорение силы тяжести, м/с<sup>2</sup>;  $P_1$  – давление сжатого воздуха перед соплом, 0.4ч0.6 МПа;  $P_2$  – давление перед выходом из сопла, равное 101300 Па.

Определим скорость истечения воздуха из патрубка ГДУ, оформленного в виде сопла Лавалья, и секундные расходы сжатого воздуха в условиях истечения в среду с давлением, близким к атмосферному, т.е. где давление ниже критического. Как известно, при таком режиме истечения на выходе из сопла устанавливается давление, равное критическому, и скорость истечения оказывается равной критической, а расход – максимальным. Критическая скорость истечения может быть определена по формуле:

$$\omega_{kp} = \sqrt{2 \frac{k}{k+1} RT_0}, \text{ м/с}, \quad (9)$$

где  $R$  – газовая постоянная;  $T_0$  – температура газа, °К.

Для сравнения – скорость звука в выходном сечении сопла:

$$a_{зв} = \sqrt{kRT_2}, \quad (10)$$

где  $T_2 = T_0 \beta^{\frac{k-1}{k}}$ ,  $\beta = \frac{P_{ср}}{P_0}$  – отношение давлений.

Расход сжатого воздуха на единичный ГДУ определяется по формуле:

$$m = m_{\max} = f \sqrt{2 \frac{k}{k+1} \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{2}{k+1}} \cdot \frac{P_1}{V_0}}, \quad (11)$$

где  $P_1$  – давление воздуха перед соплом, МПа;  $f$  – сечение сопла, м<sup>2</sup>;  $V_0$  – удельный объем воздуха перед соплом, м<sup>3</sup>/кг

$$V_0 = \frac{h_1 - u_1}{P_1}, \quad (12)$$

здесь  $h_1$  – энтальпия, кДж/кг;  $u_1$  – внутренняя энергия, кДж/кг.

Для двухатомных газов имеем следующие параметры при стандартных условиях: энтальпия  $h_1 = 283.2$  кДж/кг; внутренняя энергия  $u_1 = 209.2$  кДж/кг. Из зависимости для идеального состояния газа  $h = u + RT$  находим газовую постоянную:

$$R = \frac{h - u}{T} = \frac{(283.2 - 209.1) \cdot 10^3}{297.6} = 252.4 \text{ кДж/кг}^\circ\text{К},$$

где  $T = 273.6 + 20 = 293.6$  °К.

Отношение давлений истечения  $P_{ист} = 0.5$  МПа и среды, в которую происходит истечение  $P_{ср} = 0.1$  МПа, составляет  $\beta = 0.5/0.1 = 5$ . Тогда критическое давление для воздуха  $P_{кр} = 0.528$  МПа. Проверим, действительно ли установится критическая скорость на выходе из сопла:

$$P_0 = P_{кр} - P_{ист} = 0.528 - 0.5 = 0.028 \text{ МПа}.$$

Следовательно, давление среды ниже критического, и скорость струи должна быть близкой к звуковой:

$$a_{зв} = \sqrt{kRT_г} = \sqrt{1.4 \cdot 252.4 \cdot 293.6} = 322.1 \text{ м/с}.$$

Удельный объем воздуха при давлении  $P_{ист} = 0.5$  МПа определяем по формуле:

$$V_г = \frac{h - u}{P_{ист}} = \frac{(283.2 - 209.1) \cdot 10^3}{5 \cdot 10^5} = 0.148 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Удельный объем воздуха внутри конуса ускорителя, т.е. в зоне истечения составит:

$$V_2 = \frac{h - u}{P_2} = \frac{(283.2 - 209.1) \cdot 10^3}{1 \cdot 10^5} = 0.741 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Изменение температуры сжатого воздуха:

$$T_2 = T_0 \frac{2}{k+1} = 293.6 \frac{2}{1.4+1} = 244.6 \text{ }^\circ\text{К}.$$

Определим реальную скорость истечения воздуха по формуле (9):

$$\omega_{кр} = \sqrt{2 \frac{k}{k+1} RT_0} = \omega_2 = \sqrt{2 \frac{1.4}{1.4+1} 252.4 \cdot 293.6} = 272.2 \text{ м/с}.$$

Таким образом, можно считать, что устанавливается скорость истечения, равная местной скорости звука  $a_{зв}$ .

При диаметре сопла  $d = 15$  мм расчетная площадь выходного сечения  $f = 0.000176$  м<sup>2</sup>. Тогда по формуле (11) расход сжатого воздуха на единичный ГДУ:

$$m = 0.000176 \sqrt{2 \frac{1.4}{1.4+1} \left( \frac{2}{1.4+1} \right)^{\frac{2}{1.4+1}} \cdot \frac{5 \cdot 10^5}{0.0139}} = 0.1348 \text{ кг/с или } 485,3 \text{ кг/ч}.$$

После приведения к нормальным условиям объемный расход для индивидуальной ГДУ составит:

$$V = 485.3 \cdot 1.293 = 627.5 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

Выбор компрессорных установок осуществляется по величине общего расхода  $V$ . Суммарные объемы ресиверов выбираются на 30-40 % больше исходной производительности компрессоров.

Таким образом, определены основные технические характеристики агрегата центрифугирования, который может быть использован в «модульном комплексе» для очистки газов вместо типовых циклонных устройств большого диаметра. В частности, скорость на выходе из сопла ГДУ составляет более 270 м/с. Дальнейшие поиски базовой установки велись с учетом задачи обеспечения большой пропускной способности по газовым потокам, а также задачи повышения эффективности очистки дымовых и агрессивных газов с одновременным снижением металлоемкости, энергетических и стоимостных затрат.

Результатом анализа поставленных задач является предлагаемая установка для проведения глубокого пылегазозолоулавливания, собранная по модульной схеме (рис. 3). В «модульном комплексе» использован единый корпус – труба большого диаметра с подводными и отводящими трубами и бункерами для отвода пыли и шлама. Корпус разделен на отдельные комплектующие секции, такие как: пылесадительная камера, камера каталитической нейтрализации газов, многофункциональная адсорбционная «камера центрифугирования», а также тягодутьевая установка, в основании которой расположена гравитационная камера для улавливания конденсата и шлама.

На рисунке 3 схематично представлен «модульный комплекс» пылегазоуловителя, соответствующий авторскому патенту [8]. Устройство включает цилиндрический корпус большого диаметра, разделенный на 4 комплектующих модуля (I, II, III, IV).

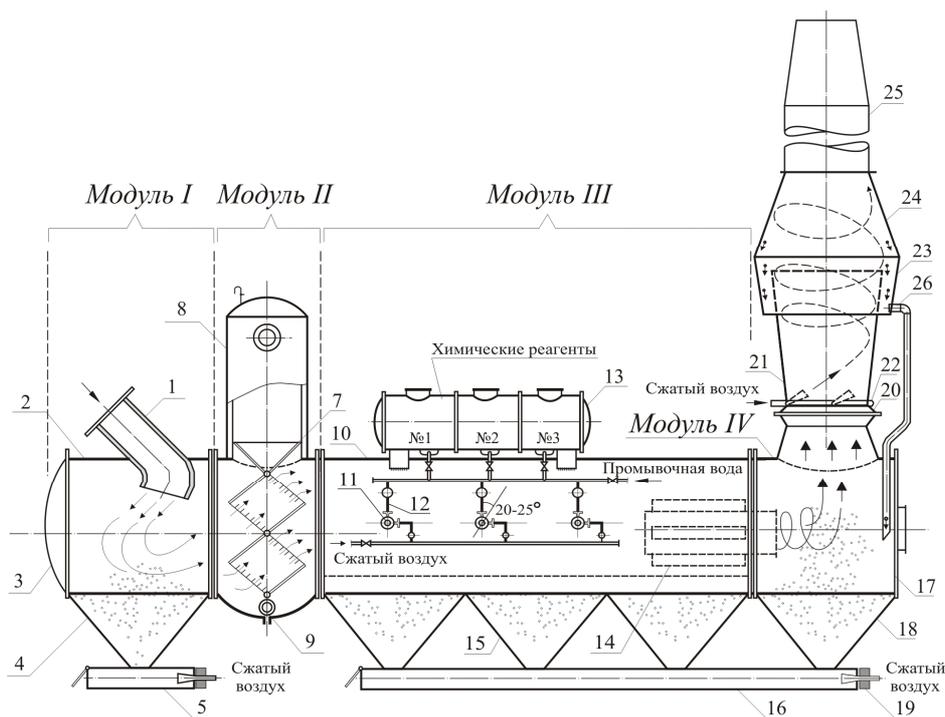


Рис. 3. «Модульный комплекс» тягодутьевого пылегазозолоулавливания из дымовых и агрессивных газов

Каждый модуль выполняет определенную функцию как ступень разделения и очистки газа и может комплектоваться в «модульный комплекс» в зависимости от производственной потребности.

Модуль I – пылесадительная камера для первичной очистки газов. Она состоит из вводной трубы 1 с коленом, введенным под углом 30° к корпусу 2 пылесадительной камеры, отбойной диафрагмы 3, сборного бункера 4 и пневмотранспортной трубы 5. Скоростной режим в пылесадительной камере находится в пределах 2.5-10 м/с. Осаждение пылевых частиц осуществляется за счет гравитационных сил и изменения направлений движения потока.

Первично очищенный методом гравитации высокотемпературный поток направляется в модуль II. Модуль II – камера каталитической нейтрализации газов – состоит из собственно камеры 6, кассет 7, выполненных в виде ромбовидных ячеек с двумя противоположными непроницаемыми стенками, двумя другими – проницаемыми: пористыми или сетчатыми. Камера каталитической нейтрализации газов снабжена дозатором 8, расположенным в верхней части камеры 6 и узлом пневмотранспорта 9, назначение которого – возврат адсорбента-катализатора в дозатор 8.

Учитывая универсальность «модульного комплекса» для использования в различных отраслях промышленности, а также на мусоросжигающих заводах и коммунальных теплогенерирующих установках, была принята противоточная схема движения таблетизированных катализаторов в кассетах с различным по составу заполнением. Каталитический способ очистки газовых выбросов позволяет при невысоких температурах самого потока, т.е. при небольших расходах энергии, очищать большие объемы дымовых и технологических газов. В составе технологических газов в виде паровоздушных смесей могут содержаться этиловый спирт, толуол, ксилол, фенол, ацетат, парафиновые углеводороды, а также другие органические вещества. Подбор катализаторов для окисления выполняется в зависимости от состава примеси. Например: для толуола и ксилола можно использовать меднохромовые системы на силикагеле при температуре потока 350-500°. При окислении других сочетаний органических примесей могут использоваться выпускаемые производством катализаторы: медные, меднохромовые, кобальтовые, кобальтохромовые и палладиевые, массивные и нанесенные на основу и т.д.

Особое место сегодня отводится нейтрализации вредных примесей в продуктах сгорания твердых бытовых отходов. На МСЗ поступают отходы различной природы, в состав которых входят тяжелые металлы и органические вещества, содержащие хлор. Диоксины, присутствующие в выбросах, в основном, образуются из хлорбензолов и хлорфенолов, как пример – поливинилхлорид (ПВХ) – из семейства пластмасс. Кроме того, в выбросах присутствуют ультрамелкие частицы (менее 0.1 мкм). Зарубежные фирмы используют известные методы улавливания диоксинов – с помощью фильтров с диспергированными частицами угля в пластике ADIOX; отработанные фильтры сжигаются [9]. Для обеспечения бесконтактного метода эксплуатации в качестве основы предлагается использовать кокс, обкатанный в активированном угле. Это позволяет снизить износ и повысить температурную устойчивость каталитической массы. Отработанный материал брикетируется и сжигается при высоких температурах.

Очищенный от определенных химических компонентов сбросный газ поступает в цилиндрический корпус 10 модуля III. Горизонтальный высокотемпературный поток газов со скоростью 2.5-10 м/с перемещается в зону действия гидродинамических ускорителей 11, где высокоскоростные потоки сжатого воздуха внедряются в дымовые и агрессивные газы тангенциально под углом 20-25° к вертикали. Суммарный поток приобретает поступательно-вращательное движение. При этом возникают интенсивные инерционные силы, воздействующие на пылевые частицы, выделяющие их из потока.

Для увеличения эффективности инерционного осаждения мелких частиц и дополнительной нейтрализации газообразных примесей в струю сжатого воздуха инжектируют дозированное количество воды или химических растворов из безнапорных емкостей 13 через дозаторы 12. В результате интенсивного вращения суммарного потока газов со скоростью, превышающей 80 м/с, мелкие частицы пыли и распыленные адсорбенты создают плотный пограничный слой во внутренней полости корпуса 10. Приторможенная инерционными силами уплотненная масса сбрасывается в бункеры 15. На выходе из секции весь газ проходит через сепаратор 14 и передается в следующую секцию.

Модуль IV – тягодутьевая установка [10] – имеет в основании гравитационную камеру 17 для улавливания остаточного конденсата и шлама, сборный бункер 18, узел инжектора 19, предназначенный для транспортирования конденсата и шлама через трубы пневмотранспорта 16. Над гравитационной камерой 17 расположена выводная труба, на которой смонтирована тягодутьевая установка 20 с вихревым конусом 21, в основании которой установлен распределительный пояс 22 для подачи сжатого воздуха. Верх вихревого конуса 21 охватывает конус-карман 23, на который насажен сборный конус 24, переходящий в сбросную трубу 25. В нижнюю часть конуса-кармана 23 введена трубка 26 для сброса конденсата и шлама, сепарированного вихревым потоком в гравитационную камеру 17.

«Модульный комплекс», как многоступенчатая пылегазозолоулавливающая установка, может работать автономно, без дымососов, за счет разрежения, создаваемого в «камере – центрифуге» (модуль III) и тягодутьевой установке (модуль IV), работающей на сжатом воздухе по принципу «торнадо».

Таким образом, в предлагаемом многосекционном модуле пылегазозолоулавливания проводятся разделение и очистка газов с использованием высокоскоростных потоков сжатого воздуха при высоких центробежных скоростях, соответствующих уровню центрифугирования. Гидродинамические ускорители, установленные тангенциально под углом 20-25° к вертикали, внедряют высокоскоростные потоки сжатого воздуха во внутреннюю полость цилиндрического корпуса и создают вихревой (закрученный) поток, образуя разрежение (тягу), что снижает общее аэродинамическое сопротивление установки. Использование сухой каталитической нейтрализации химических примесей с выбором адсорбентов расширяет универсальность «модульного комплекса», особенно при улавливании диоксинов и полиароматических углеводородов.

Возможность дозированного диспергирования воды или адсорбентов позволяет совместить процессы сухого, конденсационного и мокрого пылегазозолоулавливания путем подбора оптимальных адсорбентов и адсорбентов в зависимости от состава дымовых и агрессивных газов.

Последняя ступень очистки газа оформлена в виде безопасной тягодутьевой установки. Кроме очистки и охлаждения газа, перед выбросом в атмосферу им обеспечивается тяга во всей полости «модульного комплекса», что позволяет работать автономно без использования тяжелых тягодутьевых устройств в зоне высоких температур. Автономность работы тягодутьевой установки обеспечивается кинетической энергией вихревых потоков в «камере центрифугирования» и в безопасной вентиляционной установке. Подпитка энергией вихревых потоков осуществляется сжатым воздухом от компрессорной установки.

### Выводы

Комплектация очистных устройств в «модульный комплекс» позволяет создать универсальную многоступенчатую установку, которая обеспечивает полноту улавливания пыли, золы и нейтрализации газов. Секционная, «модульная» схема компоновки позволяет снизить металлоемкость, стоимость устройства и обслуживания. Простота конструктивного исполнения модулей позволяет изготавливать их в неспециализированных производственных условиях.

Практическая реализация «модульного комплекса» позволяет повысить эффективность разделения и очистки дымовых и агрессивных газов в широких пределах дисперсности пыли и газообразных загрязнителей, значительно снизить степень загрязнения атмосферы, а также затраты на строительство и обслуживание очистных сооружений.

«Модульный комплекс» и все его узлы сконструированы на основе запатентованных авторских разработок.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Заводы по переработке твердых бытовых и промышленных отходов в барботируемом расплаве шлака с использованием печей Ванюкова. URL: <http://www.sciteclibrary.ru/rus/catalog/pages/8954html>.
2. Гупта А., Лили Д., Сайред Н. Закрученные потоки. – М: Мир, 1987. – 588 с.
3. Каутиус В. Опыты работы горизонтальных циклонных топок. Циклонные топки / Пер. с нем. Под ред. М.А. Наджарова. – М. – Л.: Госэнергоиздат, 1958. – 152 с.
4. Лукьяненко В.М., Тарансу А.В. Промышленное оборудование. Промышленные центрифуги. – М.: Энергоатомиздат, 1974. – 376 с.
5. Садртдинов И.К., Мусаев А.М., Сафиуллин Р.Г. К расчету аппаратов для термокинетической очистки дымовых и агрессивных газов на основе высокоскоростных воздушных струй // Известия КазГАСУ, 2010, № 1(13). – С. 219-222.
6. Мазуров Д.Я., Малкин Ю.Е., Захаров Г.В. и др. Разработка и перспектива использования циклонных печей для скоростного обжига мелкоизмельченных материалов / В кн.: Циклонные энерготехнологические процессы и установки. – М.: Металлургия, 1967. – С. 98-101.
7. Андрианова Т.Н., Дзамнов Б.В., Зубарев В.Н., Ремизов С.А. Сборник задач по технической термодинамике. – М.: Энергоиздат, 1981. – 240 с.
8. Патент РФ № 96025. Модуль тягодутьевого пылегазозолоулавливания из дымовых и агрессивных газов. Мусаев А.М., Садртдинов И.К. Гос. регистр. 20.07. 2010.
9. Газоочистка ADIOX. URL: <http://www.zaobt.ru/solutions/waste/adiox>.
10. Патент РФ № 2365819. Способ безопасного усиления тяги в дымовых и вентиляционных каналах и устройство безопасного усиления тяги дымовых и вентиляционных каналов. Мусаев А.М. Гос. регистр. 27.08.2009.