

УДК 621.928.37+621.928.93

**Д. И. Мисюля**, кандидат технических наук, ассистент (БГТУ);

**П. Е. Вайтехович**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой (БГТУ);

**В. В. Кузьмин**, кандидат технических наук, доцент (БГТУ);

**К. А. Карпов**, студент (БГТУ)

### **ОБЕСПЫЛИВАНИЕ ГАЗОВ, ВЫХОДЯЩИХ ИЗ СТЕКЛОВАРЕННОЙ ПЕЧИ**

В статье представлена новая конструкция прямооточного циклонного пылеуловителя для сухой механической очистки газов, выходящих из стекловаренной печи. Приведены результаты численного моделирования аэродинамики, гидравлического сопротивления и эффективности улавливания пыли в разработанном циклоне, применение которого обеспечит улавливание слипающей пыли с эффективностью не менее 70% для частиц диаметром 10 мкм и более при гидравлическом сопротивлении, не превышающим 1400 Па.

The article presents a new design of the direct-flow cyclonic dust collector for dry mechanical cleaning of the gases leaving the glass-worked furnace. Results of numerical modeling of aerodynamics, pressure drop and separation efficiency of the developed cyclone are given which application will provide catching of a sticking together dust with efficiency not less than 70% for particles with a diameter of 10  $\mu\text{m}$  and more at the pressure drop not exceeding 1400 Pa.

**Введение.** Важнейшим резервом экономии и рационального использования топливно-энергетических ресурсов, а также улучшения экологического состояния окружающей среды является утилизация теплоты отходящих газообразных потоков различного топливно- и энергоиспользующего оборудования.

Вопросы очистки газов стекловаренных печей являются весьма актуальными, поскольку в этом случае обеспечивается не только защита окружающей среды от вредных выбросов, но и осуществляется использование очищенных газов в качестве вторичного энергоресурса, что позволяет получить за счет утилизации газа значительный экономический эффект.

**Основная часть.** Данная проблема весьма актуальна и для белорусских предприятий ОАО «Полоцк-Стекловолокно» и ОАО «Гродненский стеклозавод». При существующих системах отвода запыленных газов от стекловаренной печи они проходят через газоход с вертикальным и горизонтальным участками в котел-утилизатор и далее на очистку.

При прохождении газа через горизонтальный участок газохода и в котле-утилизаторе под действием сил тяжести и инерции, а также адгезии происходит выпадение и накопление пылевых частиц в данных местах, что приводит к их зарастанию с необходимостью периодической остановки и очистки. Задачей настоящей статьи является разработка пылеуловителя для очистки газов после стекловаренной печи перед котлом-утилизатором с целью предотвращения или минимизации указанного негативного явления и увеличения продолжительности работы котла-утилизатора между остановками. Для исключения дополнительных изгибов и горизонтальных участков газохода, в которых могло

бы происходить выпадение и накопление пыли до попадания в пылеуловитель, необходимо его расположить непосредственно под вертикальным участком газохода.

Отсутствие готового аппарата, отвечающего всем заданным условиям, потребовало проведения дополнительных исследований и разработки соответствующей конструкции пылеуловителя.

На основании обзора и анализа существующих способов разделения пылегазовых потоков для разрабатываемой системы очистки газов после стекловаренной печи был выбран инерционный (центробежный) способ улавливания.

В современной промышленности наибольшее распространение получили центробежные пылеуловители циклонного типа.

На основе анализа существующих конструкций циклонных пылеуловителей и требований к проектируемому аппарату, среди которых одним из главных является исключение опасности отложения пыли, был выбран прямооточный тип циклона с вертикальным расположением корпуса и осесимметричным вводом потока по направляющим лопаткам.

За основу был принят прямооточный циклон ЦКТИ: данные циклоны были рекомендованы Центральным котлотурбинным институтом в качестве первой ступени для ряда систем очистки отходящих горячих газов.

Использование осесимметричного ввода потока по направляющим лопаткам вместо тангенциального входного патрубка одновременно с вертикальным исполнением корпуса позволит присоединить пылеуловитель непосредственно к вертикальному участку газохода и вводить запыленный газ в аппарат без дополнительных

поворотов, в которых могло бы происходить выпадение пылевых частиц (под действием сил тяжести и инерции). Кроме того, прямоточные циклоны по сравнению с противоточными имеют меньшие габариты в горизонтальной плоскости за счет более высокой условной скорости газа (т. е. скорости газа, отнесенной к сечению аппарата).

Для уточнения и оптимизации отдельных конструктивных параметров и размеров проектируемого пылеуловителя, исходя из предъявляемых к нему требований, необходимо проведение дополнительных исследований.

Методика подбора циклона с соответствующим расчетом гидравлического сопротивления и эффективности очистки в настоящее время основаны преимущественно на экспериментально определяемых параметрах (коэффициент гидравлического сопротивления, фракционная эффективность очистки, параметры, характеризующие общую эффективность очистки, – диаметр частиц, улавливаемых с эффективностью 50%, и стандартное отклонение в функции распределения фракционной эффективности) [1–3]. Определение таких параметров при разработке новых и модернизации, совершенствовании существующих конструкций сопряжено с известными трудностями, вызванными необходимостью изготовления опытных моделей новых конструкций, погрешностей, связанных с методиками проведения экспериментов и используемыми приборами измерения, переносом полученных на опытной модели результатов на реальную промышленную конструкцию. Примером тому могут служить отличия коэффициентов гидравлического сопротивления и параметров, характеризующих эффективность очистки одних и тех же циклонов по данным разных источников [4–7]. В связи с этим в СССР было рекомендовано всем организациям-разработчикам новых сухих инерционных пылеуловителей направлять их образцы в Семибратовский филиал НИИОГаз для стендовых испытаний [4].

Развитие вычислительной техники и технологии численного моделирования различных процессов предоставило альтернативную возможность проведения виртуального (численного) эксперимента. Это позволяет исключить или минимизировать материальные, трудовые и временные затраты, связанные с изготовлением опытных моделей новых конструкций, проводить исследования различных вариантов конструкций в идентичных условиях, дает возможность изучения процессов, реальное моделирование которых затруднительно или невозможно, например, вследствие высоких температур его проведения, как это имеет место в рассмат-

риваемом случае очистки горячих газов, отходящих из стекловаренной печи.

Для исследования проектируемой системы очистки применялось численное моделирование, основанное на применении пакетов вычислительной гидродинамики.

Коэффициент гидравлического сопротивления разрабатываемого циклонного пылеуловителя определялся с помощью формулы [8, 9]

$$\zeta = \frac{2\Delta p}{\rho w^2},$$

где  $\Delta p$  – гидравлическое сопротивление, определяемое по разности полных давлений на входе в циклон и на выходе из него, Па;  $\rho$  – плотность газа, кг/м<sup>3</sup>;  $w$  – условная скорость газового потока в циклоне, рассчитываемая по формуле

$$w = \frac{4Q}{\pi D^2},$$

где  $Q$  – объемный расход газов, м<sup>3</sup>/с;  $D$  – внутренний диаметр корпуса циклона, м.

Эффективность улавливания пыли (степень, коэффициент очистки)  $\eta$ , %, определялась с помощью зависимости [5, 6]

$$\eta = 100 (1 - c_{\text{вых}} / c_{\text{вх}}),$$

где  $c_{\text{вых}}$ ,  $c_{\text{вх}}$  – объемная концентрация пыли на выходе из пылеуловителя и на входе в него, г/м<sup>3</sup>.

Моделирование траекторий движения частиц в проблемном горизонтальном участке газохода перед котлом-утилизатором подтвердило факт концентрирования частиц наиболее крупного размера вблизи нижней внутренней поверхности трубы, что свидетельствует об опасности отложения здесь пыли.

Первоначально была исследована возможность установки простейшего инерционно-гравитационного пылеуловителя в виде цилиндрического бункера в месте перехода вертикального участка газохода в горизонтальный.

Моделирование процесса очистки в таком пылеуловителе показало его низкую эффективность. Большая часть частиц даже такого крупного размера как 50 мкм не улавливается в аппарате, захватываясь уходящим потоком.

Как упоминалось ранее за основу для разрабатываемой конструкции пылеуловителя был выбран прямоточный циклон с вертикальным расположением корпуса и осесимметричным вводом потока по направляющим лопаткам, которые позволят присоединить пылеуловитель непосредственно к вертикальному участку газохода и вводить запыленный газ в аппарат без дополнительных поворотов, в которых могло бы происходить выпадение и накопление пылевых частиц.

Нами был разработан и смоделирован ряд вариантов конструкций прямооточного циклонного пылеуловителя и проанализированы траектории движения частиц пыли, распределения давления и скоростей газового потока, эффективность улавливания и гидравлическое сопротивление для следующих случаев:

- с различными конструкциями закручивающих аппаратов (завихрителей);
- с различными конструктивными параметрами завихрителей: числом и углом наклона нижней кромки лопастей, диаметром и высотой сердечника, установленными обтекателями;
- с различной формой нижней части корпуса пылеуловителя – конической и цилиндрической;
- с выводом газов через корпус циклона и различными высотами сепарационной зоны пылеуловителя;
- с различным диаметром выхлопной трубы и с диффузором на ней;
- с выводом газов через бункер;
- с установленным на выхлопной трубе отбойным кольцом и различными соотношениями диаметров сердечника, выхлопной трубы и высоты нижнего обтекателя.

При осесимметричном вводе потока применяются два основных типа закручивающих аппаратов (завихрителей) – «розетка» (рис. 1, *а*) и «винт» (рис. 1, *б–г*).

Первоначально для установки в проектируемую конструкцию был выбран закручивающий аппарат типа «розетка», поскольку он имеет малую высоту, хотя и менее устойчив к залипанию [2, 3]. Однако выполненные чертеж и 3D-модель циклона с таким 8-лопаточным завихрителем (рис. 1, *а*) показали, что щелевые зазоры для прохода газа между его лопатками являются довольно узкими, поэтому налипание и накопление на них пыли может привести к частичному или полному перекрытию межлопаточных зазоров и, соответственно, нарушению работы пылеуловителя. Для предотвращения этого было решено уменьшить число лопаток для исключения перекрытий между ними, а также исследовать возможность увеличения угла наклона лопаток к горизонтальной плоскости.

С целью предотвращения накопления пыли на верхней торцевой поверхности сердечника закручивающего аппарата и более плавного входа газового потока в закручивающий аппарат на нем был установлен обтекатель. Были проведены исследования двух вариантов обтекателя – полусферического и конического. Кроме того, для плавного выхода газа в сепарационную зону на нижней торцевой поверхности сердечника закручивающего аппарата был также установлен конический обтекатель.

Моделирование работы этих конструкций показало, что уменьшение числа лопаток негативно сказывается на интенсивности закручивания газового потока, и, как следствие, значительно ухудшает эффективность пылеулавливания в циклоне. Увеличение угла наклона лопаток со стандартного значения 30° до 45° с целью уменьшения опасности налипания и накопления частиц пыли на верхней поверхности лопаток также привело к резкому уменьшению интенсивности закручивания газа и эффективности пылеулавливания. Установка обтекателей на нижней и верхней сторонах сердечника закручивающего аппарата уменьшила турбулентность потока в этих местах, что положительно сказывается на эффективности сепарации частиц. При этом не было отмечено преимуществ полусферического обтекателя перед коническим, поэтому в дальнейшем было решено использовать более простую, коническую форму обтекателя.

В связи с полученными результатами было принято решение использовать завихритель типа «винт», имеющий значительно более широкие межлопастные каналы и плавный изгиб лопастей и считающийся предпочтительным и более надежным при улавливании слипающейся пыли [3], что является одним из основных требований к разрабатываемому пылеуловителю.

С точки зрения надежности работы в условиях улавливания слипающейся пыли была изменена форма нижней части корпуса циклона, примыкающая к бункеру. В принятом за основу циклоне ЦКТИ используется коническая нижняя часть, однако при этом значительно сужается зазор для прохода пыли с частью газа в бункер, особенно с учетом частичного перекрытия конуса патрубком вывода очищенного газа (выхлопной трубой). Это, с одной стороны, уменьшает объем газа, проходящий в бункер, и, соответственно, его возможности транспортировки туда улавливаемых пылевых частиц, с другой стороны – создает опасность зарастания зазора при налипании частиц на внутреннюю поверхность конуса и выходящий здесь патрубок вывода очищенного газа.

Исследования влияния формы нижней части корпуса показали, что наряду с повышенной надежностью и упрощением конструкции применение цилиндрической нижней части корпуса (рис. 1, *б*) повышает эффективность очистки, что, по-видимому, объясняется большими объемами газа, попадающими в бункер, и интенсивностью транспортировки туда пылевых частиц, а также меньшим негативным влиянием патрубка вывода очищенного газа на интенсивность вращения потока.

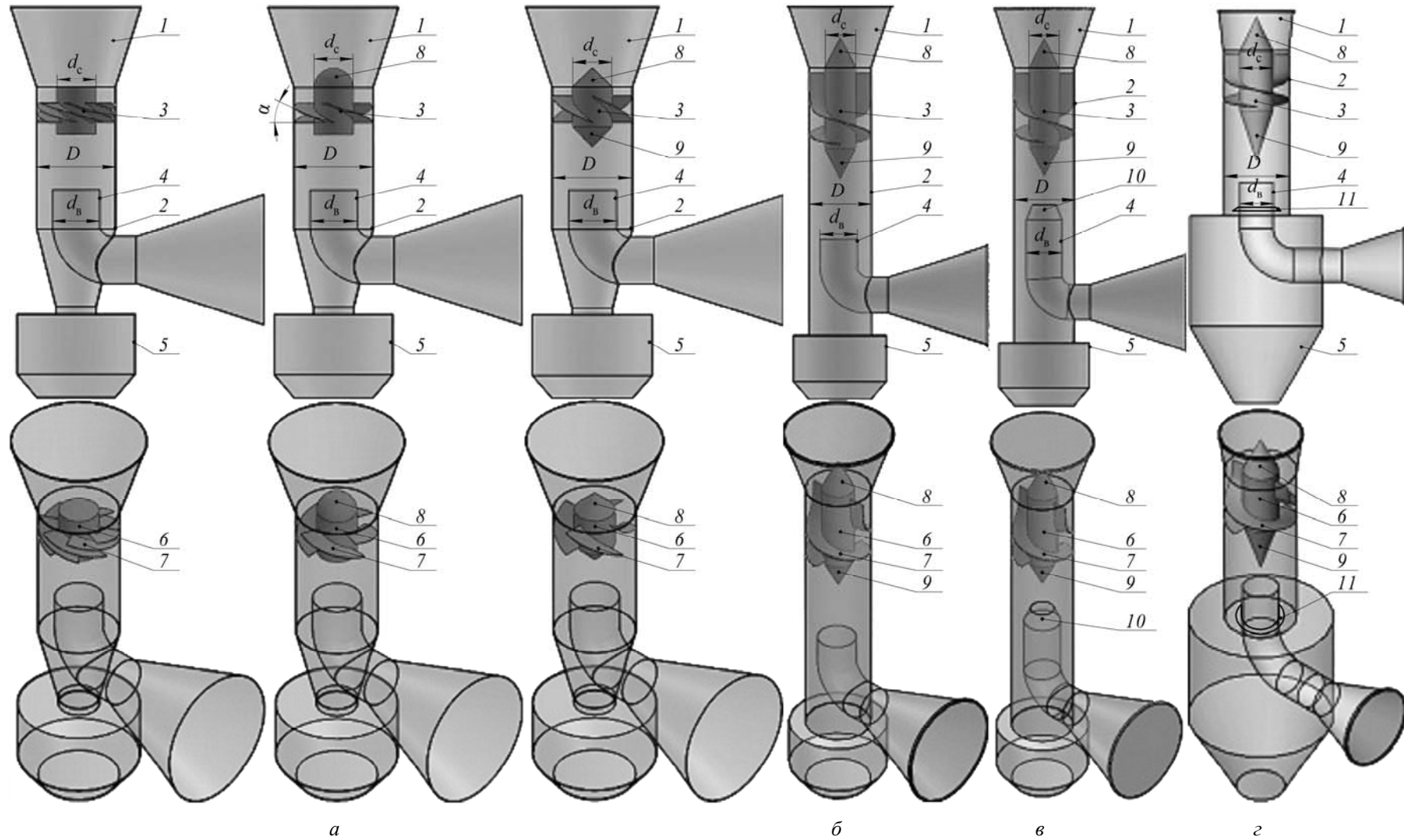


Рис. 1. Конструкции исследованных циклонов:

*a* – с завихрителем типа «розетка» и различными обтекателями; *б* – с завихрителем типа «винт» и цилиндрическим корпусом аппарата;

*в* – с диффузором на выхлопной трубе; *г* – с выводом газов через бункер и отбойным кольцом:

1 – входной патрубок; 2 – корпус аппарата; 3 – завихритель; 4 – патрубок вывода очищенного газа (выхлопная труба); 5 – бункер; 6 – цилиндрическая часть (сердечник) завихрителя; 7 – лопасти завихрителя; 8 – верхний обтекатель; 9 – нижний обтекатель; 10 – диффузор; 11 – отбойное кольцо;

$D$ ,  $d_b$ ,  $d_c$  – диаметр циклона, выхлопной трубы и сердечника соответственно;  $\alpha$  – угол наклона нижней кромки лопастей

Исследование закручивающего аппарата типа «винт» с различным углом наклона нижней кромки лопастей (в диапазоне 10–30°) и числом лопастей (от 2 до 4) показало, что наиболее предпочтительной является двухлопастная конструкция завихрителя с углом наклона нижней кромки лопастей 25–30°. При уменьшении угла наклона чрезмерно увеличивается тангенциальная скорость газа и, как следствие, гидравлическое сопротивление пылеуловителя. Кроме того, на выходе из закручивающего аппарата наблюдалось зависание частиц с образованием вращающегося в одной плоскости кольца пыли.

Удлинение цилиндрической части сердечника завихрителя не оказало существенного влияния на работу циклона, не предотвратив и образование кольцевого слоя пыли под завихрителем.

Изучение влияния высоты основного сепарационного пространства (расстояния между нижними кромками лопастей завихрителя и входом в патрубок выхода очищенного газа) с учетом данных литературных источников [10] позволило определить ее наиболее рациональное значение, примерно равное диаметру корпуса циклона.

Исследование работы пылеуловителя при различном диаметре патрубка выхода очищенного газа, принимавшемся в диапазоне от 0,4 до 0,6 диаметра циклона, показало, что уменьшение диаметра приводит к некоторому увеличению эффективности очистки и к существенному росту гидравлического сопротивления аппарата. Кроме того, как и в случае с уменьшенным углом наклона нижней кромки лопастей закручивающего аппарата наблюдалось зависание частиц с образованием вращающегося кольца пыли под завихрителем. Эффект образования кольца не наблюдался при диаметре патрубка, равном 0,6 диаметра корпуса циклона, поэтому этот размер и был принят как окончательный.

Установка диффузора на выхлопной трубе (рис. 1, в) оказала такое же влияние на работу пылеуловителя, как и обычное уменьшение диаметра трубы.

Сам выпускной патрубок очищенного газа было решено опустить ниже и осуществить его вывод из аппарата через стенку бункера (рис. 1, г), что позволило уменьшить высоту цилиндрической части корпуса и минимизировать негативное влияние горизонтальной части выпускного патрубка на интенсивность вращения газа у входа в него, в нижней части пылеуловителя. Кроме того, вывод выпускного патрубка через бункер позволит устранить конденсацию влаги в нем при очистке горячих га-

зов и уменьшить, а то и полностью устранить зависание уловленной пыли при ее выгрузке (в случае выгрузки пыли при работающем пылеуловителе или вскоре после выключения).

Для повышения эффективности работы вихревых и прямоочных пылеуловителей практикуется установка на наружной поверхности в верхней части выхлопной трубы отбойного кольца или пылеотбойной шайбы (рис. 1, з).

Результаты численного моделирования распределения давления, траекторий движения частиц газа и пыли в различных конструкциях прямоочного циклона представлены на рис. 2.

Исследования циклона с установленным отбойным кольцом подтвердили повышение эффективности пылеулавливания при использовании такого кольца. Однако при этом уменьшился объем газов, направляющийся в бункер с соответственным уменьшением интенсивности транспортировки им в бункер улавливаемых частиц. Учитывая одновременное сужение отбойным кольцом зазора для прохода газа с пылью между выхлопной трубой и стенкой корпуса и опасность прилипания и зависания пыли на самом кольце, было решено от него отказаться и использовать обычную выхлопную трубу.

На основании моделирования работы циклона с различной высотой нижнего конического обтекателя закручивающего аппарата (варьировалась в диапазоне от нуля до 2,5 диаметров сердечника) была выбрана его высота, равная 1,25 диаметра сердечника.

При определенных соотношениях диаметров сердечника завихрителя и выхлопной трубы наблюдался эффект образования кольца вращающейся под завихрителем пыли, в связи с чем был выбран диаметр цилиндрической части сердечника, равный 0,6 диаметра корпуса циклона.

Рекомендуемая условная скорость газа для прямоочных циклонов находится в диапазоне 5–8 м/с [10]. Для определения оптимальной скорости было проведено моделирование и анализ процесса очистки в указанном диапазоне скоростей с интервалом в 1 м/с.

Исследования показали, что для разработанного аппарата наибольшая эффективность пылеулавливания достигается в диапазоне скоростей 7–8 м/с. Увеличение скорости газа до верхней границы рекомендуемого диапазона также позволяет уменьшить диаметр и другие, связанные с ним, размеры пылеуловителя, а значит и его материалоемкость, массу и стоимость.

На основании проведенных исследований разработана новая конструкция прямоочного циклона для очистки горячих газов, представленная на рис. 3.

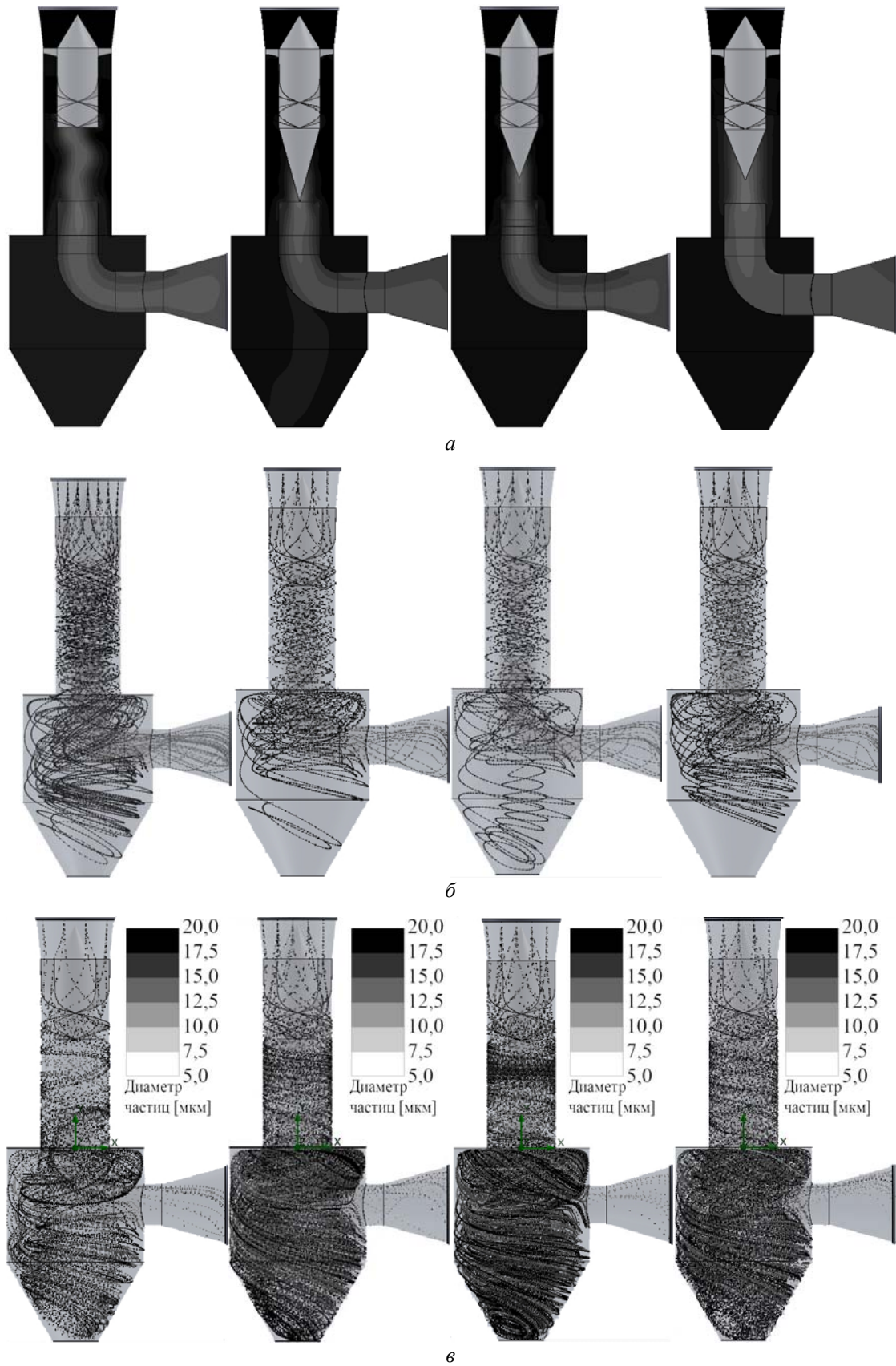


Рис. 2. Результаты исследований конструкций циклонов с установленным на выхлопной трубе отбойным кольцом и различными соотношениями диаметров сердечника, выхлопной трубы и высоты нижнего обтекателя:  
*a* – распределение полного давления (более светлые области соответствуют более низкому давлению);  
*б* – траектории движения частиц газа; *в* – траектории движения частиц пыли

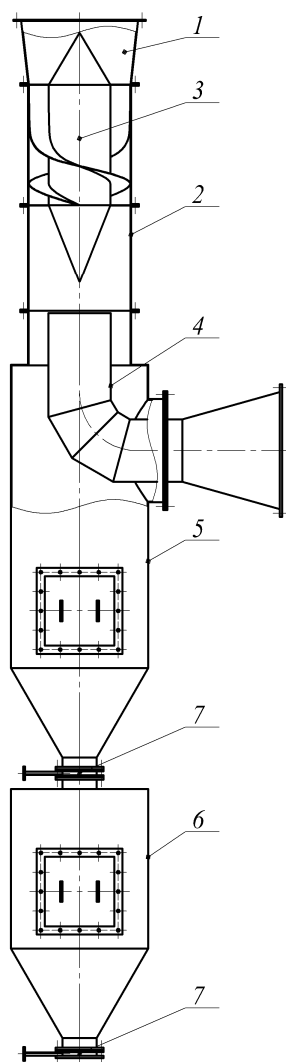


Рис. 3. Разработанная конструкция прямоточного циклонного пылеуловителя для очистки газов, отходящих из стекловаренной печи:

- 1 – входной патрубок; 2 – корпус циклона;  
 3 – закручивающий аппарат (завихритель);  
 4 – выхлопная труба; 5 – основной бункер;  
 6 – вспомогательный бункер; 7 – задвижка

Разработанный прямоточный циклон состоит из вертикального цилиндрического корпуса 2 с осесимметричным вводом потока через входной патрубок 1 и закручивающий аппарат 3, выхлопной трубы 4, отводящей очищенные газы через основной бункер 5. Учитывая высокую температуру выходящих из стекловаренной печи газов (порядка 600–700°C), для обеспечения непрерывной работы аппарат должен быть выполнен из соответствующей стали (например, марки 12X18H10T) и снабжен дополнительным бункером 6, расположенным под основным бункером 5,

и двумя задвижками 7. Это позволяет осуществлять выгрузку уловленной горячей пыли из основного бункера 5 в дополнительный бункер 6, где пыль охладится до требуемой для безопасной выгрузки температуры.

**Заключение.** Разработанный для очистки выходящих из стекловаренной печи газов прямоточный циклонный пылеуловитель обеспечивает улавливание слипающей пыли с эффективностью не менее 70% для пылевых частиц диаметром 10 мкм и более при гидравлическом сопротивлении, не превышающем 1400 Па.

### Литература

1. Тимонин, А. С. Инженерно-экологический справочник: в 3 т. / А. С. Тимонин. – Калуга: Изд-во Н. Бочкаревой, 2003. – Т. 1. – 917 с.
2. Швыдкий, В. С. Очистка газов: справ. изд. / В. С. Швыдкий, М. Г. Ладыгичев. – М.: Теплоэнергетик, 2002. – 640 с.
3. Тимонин, А. С. Основы конструирования и расчета химико-технологического и природоохранного оборудования: справ.: в 3 т. / А. С. Тимонин. – Калуга: Изд-во Н. Бочкаревой, 2002. – Т. 2. – 1025 с.
4. Коузов, П. А. Очистка газов и воздуха от пыли в химической промышленности / П. А. Коузов, А. Д. Мальгин, Г. М. Скрябин. – 2-е изд., перераб. и доп. – СПб.: Химия, 1993. – 320 с.
5. Красовицкий, Ю. В. Обеспыливание промышленных газов в фаянсовом производстве / Ю. В. Красовицкий, А. В. Малинов, В. В. Дуров. – М.: Химия, 1994. – 272 с.
6. Справочник по пыле- и золоулавливанию / М. И. Биргер [и др.]; под общ. ред. А. А. Русанова. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 312 с.
7. Ладыгичев, М. Г. Зарубежное и отечественное оборудование для очистки газов: справ. изд. / М. Г. Ладыгичев, Г. Я. Бернер. – М.: Теплотехник, 2004. – 694 с.
8. Новый справочник химика и технолога. Процессы и аппараты химических технологий: в 2 ч. / Г. М. Островский [и др.]. – СПб.: Профессор, 2006. – Ч. 2. – 916 с.
9. Штокман, Е. А. Очистка воздуха: учеб. пособие / Е. А. Штокман. – М.: Изд-во АСВ, 2007. – 312 с.
10. Лазарев, В. А. Циклоны и вихревые пылеуловители: справ. / В. А. Лазарев. – 2-е изд., перераб. и доп. – Н. Новгород: Фирма ОЗОН-НН, 2006. – 320 с.

Поступила 20.02.2013