УДК 504.3.054

А.Г. БУТЕНКО, к.т.н., доцент, **Е.В. ОСИПЕНКО,** старший преподаватель, **С.Ю. СМЫК,** аспирант
Одесский национальный политехнический университет

АППАРАТ СБОРА И ОЧИСТКИ ЗАГРЯЗНЕННЫХ ГАЗОВ В ЗАМКНУТОЙ СИСТЕМЕ

Проведено исследование аппарата сбора и очистки загрязненных газов для замкнутых систем. Путем численного моделирования определены аэродинамические и эксплуатационные характеристики, позволяющие проектировать аппараты для условий различных производств.

замкнутая система очистки, аэродинамическая завеса, закрутка потока, эффективность захвата

В традиционных системах обеспыливания газы после очистки выбрасываются в атмосферу. Поскольку они несут в себе остаточную концентрацию твердых частиц, такой подход приводит к загрязнению окружающей природной среды. Для технологических процессов, в которых, кроме пыли, образуются еще и газы, подлежащие удалению, такие системы являются безальтернативными (например, при сжигании твердого топлива). Но существуют производства или их отдельные стадии, на которых выделение пыли не сопровождается образованием газов. К их числу можно отнести столярные цеха, цеха по перегрузке сыпучих материалов (угля, минеральных удобрений и др.). Для них может быть предложена замкнутая система очистки [1]. Ее принципиальным отличием является то, что очищенный воздух, содержащий остаточную концентрацию твердых частиц, не выбрасывается в атмосферу, а возвращается к источнику загрязнения. Это устраняет вредное влияние на окружающую природную среду, позволяет избежать потерь перегружаемого сырья, поддерживает в помещении баланс воздуха и во многих случаях уменьшает его перекачиваемые объемы, что снижает энергопотребление вентиляторов и способствует компактности системы.

В зависимости от физических свойств и дисперсного состава пыли, а также характера производства замкнутая система может комплектоваться различным стандартным оборудованием по очистке и отводу газов. Поскольку широко распространенные в системах аспирации традиционные зонты [2, 3] в замкнутых циклах использоваться не могут, то принципиально нового конструктивного решения требует система отвода загрязненного и возвращения очищенного газа.

Задачу сбора-выдачи предлагается решить с помощью схемы, в которой загрязненный газ отсасывается

© А.Г. Бутенко, Е.В. Осипенко, С.Ю. Смык

от источника через цилиндрическую трубу, а очищенный возвращается по кольцевому коаксиальному ей каналу (рис. 1). При этом необходимо так оптимизировать движение газовых потоков в помещении, чтобы кольцевая струя выполняла функцию аэродинамической завесы, т.е. локализовала местный источник загрязнения. Локализация, с одной стороны, исключит подсасывание чистого воздуха в систему обеспыливания, а с другой – улучшит условия труда в помещении.

Методом анализа размерностей показано [4], что основными критериями, по которым следует моделировать гидродинамику взаимодействия рассматриваемых потоков, являются числа подобия:

$$\pi_1 = \frac{v_{кр}}{v_{кол}};\ \pi_2 = Re_{кол};\ \pi_3 = \frac{u_\infty}{v_{кол}};$$
$$\pi_4 = \frac{R_{кр}}{R_{кол}};\ \pi_5 = \frac{l_\infty}{R_{кол}}, \qquad (1)$$

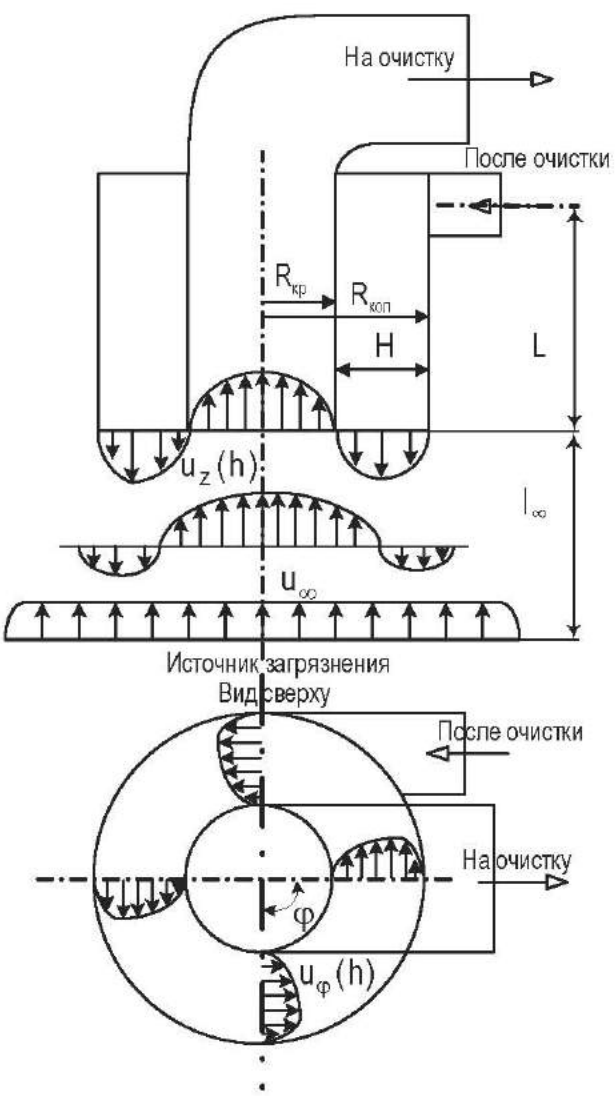

Рисунок 1 – Принципиальная схема аппарата

где $v_{кр}$ и $v_{кол}$ – среднерасходные скорости в круглой и кольцевой трубах соответственно; u_∞ – скорость, с которой загрязненный поток выходит из источника.

Моделирование проводилось с помощью лицензионного прикладного пакета SolidWorks Cosmosflo, в котором на основе $k - \varepsilon$ модели турбулентности численными методами решались дифференциальные уравнения движения газа [5]. При этом длина l_∞ оставалась фиксированной, и потому критерий π_5 задавался только внешним радиусом кольцевого канала. Скорость собранного газа $v_{кр}$ фактически является зависимым параметром, поскольку определяется как геометрическими параметрами объекта, так и скоростями $v_{кол}$ и u_∞. Поэтому π_1 – не определяющий критерий, а следствие процесса. На основании этого он был исключен из рассмотрения. Также не учитывался критерий π_2, поскольку численное моделирование проводилось в автомодельной по числу Рейнольдса зоне. В ходе численных экспериментов варьировались значения π_3 (0,02–0,34) и π_4 (принимались три его значения – 0,38; 0,5 и 0,78).

Отдельного обоснования требует схема соединения патрубка очищенного потока с аппаратом. Моделирование показало, что при радиальном подводе (ось патрубка обратного потока пересекалась с осью аппарата) кольцевая струя является узкой, неосесимметричной и дальнобойной. Она делает зону сбора загрязненного газа (область, в которой вертикальная составляющая скорости течения направлена вверх, т.е. к собирающей трубе) небольшой по размерам, что неприемлемо для собирающего аппарата. Этого недостатка можно избежать путем закрутки очищенного потока, поскольку известно, что закрученные свободные струи по своей кинематической структуре существенно отличаются от прямоточных [6, 7]. По мере увеличения закрутки границы струи становятся более широкими, в ее осевой зоне при умеренной закрутке появляется «провал» осевой составляющей, а при сильной – обратное течение. Оно вызвано снижением давления вблизи оси струи. Расход обратного течения обеспечивается за счет кольцевой струи и загрязненного газа. Таким образом, закрученная кольцевая струя способна гораздо лучше выполнять функцию аэродинамической завесы и при этом не только не уменьшать область течения загрязненного газа к собирающему устройству, а и способствовать такому течению.

Из возможных средств закрутки струи был избран тангенциальный подвод (Т-завихритель) [6]. Узел локализации с таким завихрителем отличается от аппарата с радиальным подводом лишь асимметрическим положением патрубка, который подводит очищенный воздух. Однако такое небольшое изменение конструкции, как показали результаты численного моделирова-

ния, существенно повлияло как на характеристики свободных струй, так и на течение в напорном кольцевом канале.

Степень закрутки потока в напорном канале может характеризоваться интегральным параметром Φ_* – отношением момента количества движения потока в выделенном сечении M к осевому количеству движения K в масштабе линейного размера L [6, 7]:

$$\Phi_* = \frac{M}{KL}. \qquad (2)$$

Рассчитывались значения параметра закрутки средней осевой и вращательной составляющей скорости при различном удалении сечения от выходного сечения аппарата z для створов φ = 0°, 90°, 180°, 270° по соотношениям:

$$\Phi_* = \frac{\int_0^H u_z(h)u_\varphi(h)hdh}{R_{кр}\int_0^H u_z^2(h)dh}, \qquad (3)$$

$$v_z = \frac{1}{H}\int_0^H u_z(h)dh, \quad v_\varphi = \frac{1}{H}\int_0^H u_\varphi(h)dh.$$

Графики изменения этих параметров вдоль кольцевого канала свидетельствуют, что поток является не только закрученным, но и винтовым (рис. 2, 3, 4). При этом вращательная составляющая скорости вдоль канала уменьшается, а параметр закрутки для разных створов сечения существенно отличается. Эта угловая несимметричность потока на выходе ведет к такому же неосесимметричному характеру свободной кольцевой струи.

Кроме того, закрутка потока привела к увеличению ширины заградительной струи и размеров зоны сбора. При этом энергия аэродинамической завесы в значительной степени состоит из кинетической энергии вращательного движения. Поэтому воздух завесы, который содержит остаточную концентрацию пыли, не отдаляется от собирающего аппарата, а это является необходимым условием очередного его возвращения в центральную трубу и далее на очистительное оборудование.

То обстоятельство, что зона сбора при приближении к источнику загрязнения расширяется, позволяет использовать аппараты со значительно меньшими поперечными размерами, чем источник. При моделировании принималось соотношение диаметра аппарата к диаметру источника 0,5.

Очевидно, что эффективность улавливания (захвата) пылевых частиц η, кроме геометрических и режимных параметров аппарата, зависит от фракционного состава пыли, формы частиц и их физических характеристик (плотности, способности к коагуляции и т.п.). Поскольку в использованной математической модели возможно рассмотрение частиц только сферической формы, которые не взаимодействуют между собой, то изучалась зависимость η только от размеров частиц Δ и их плотности ρ.

Результаты, приведеные на рис. 5, показали, что лучше захватываются в собирающий аппарат легкие и мелкие пылинки. Это объясняется тем, что, вылетая из источника загрязнения, они имеют небольшую собственную кинетическую энергию, следовательно, их траектории движения в большей мере совпадают

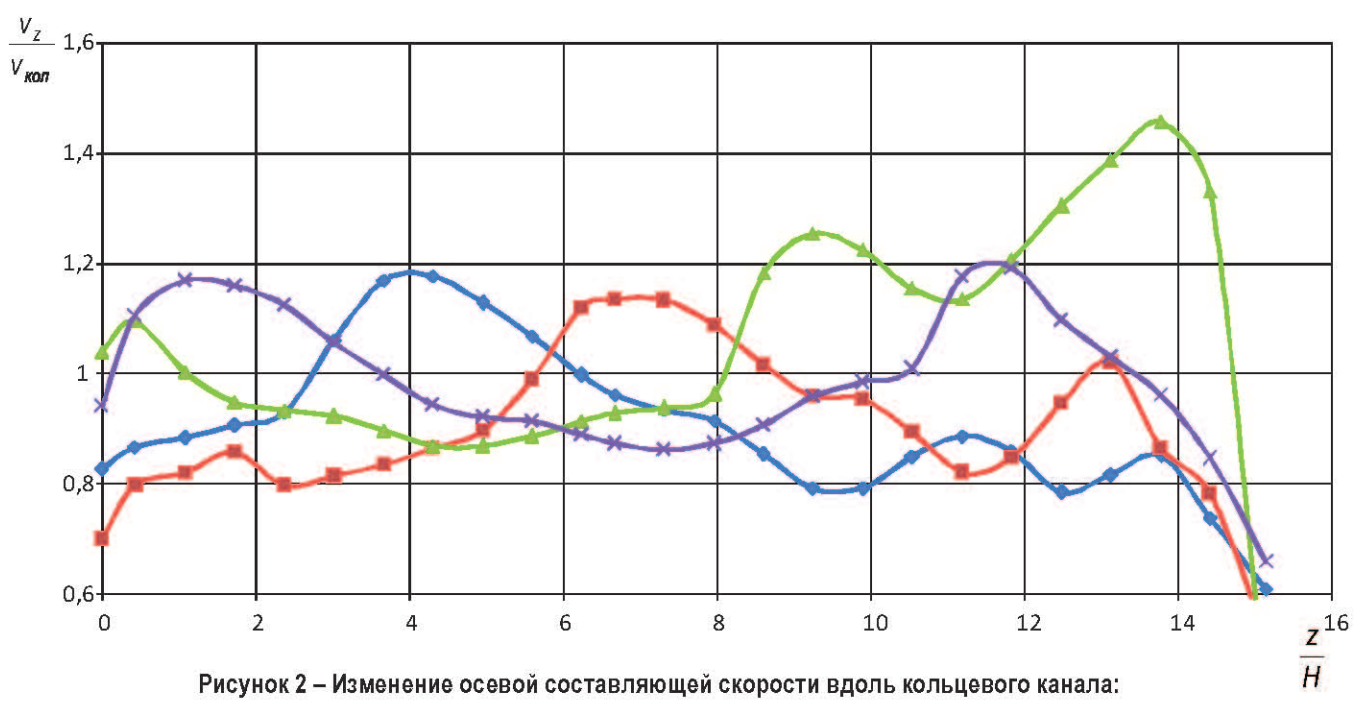

Рисунок 2 – Изменение осевой составляющей скорости вдоль кольцевого канала:

♦ – φ = 0°, ■ – φ = 90°, ▲ – φ = 180°, × – φ = 270°

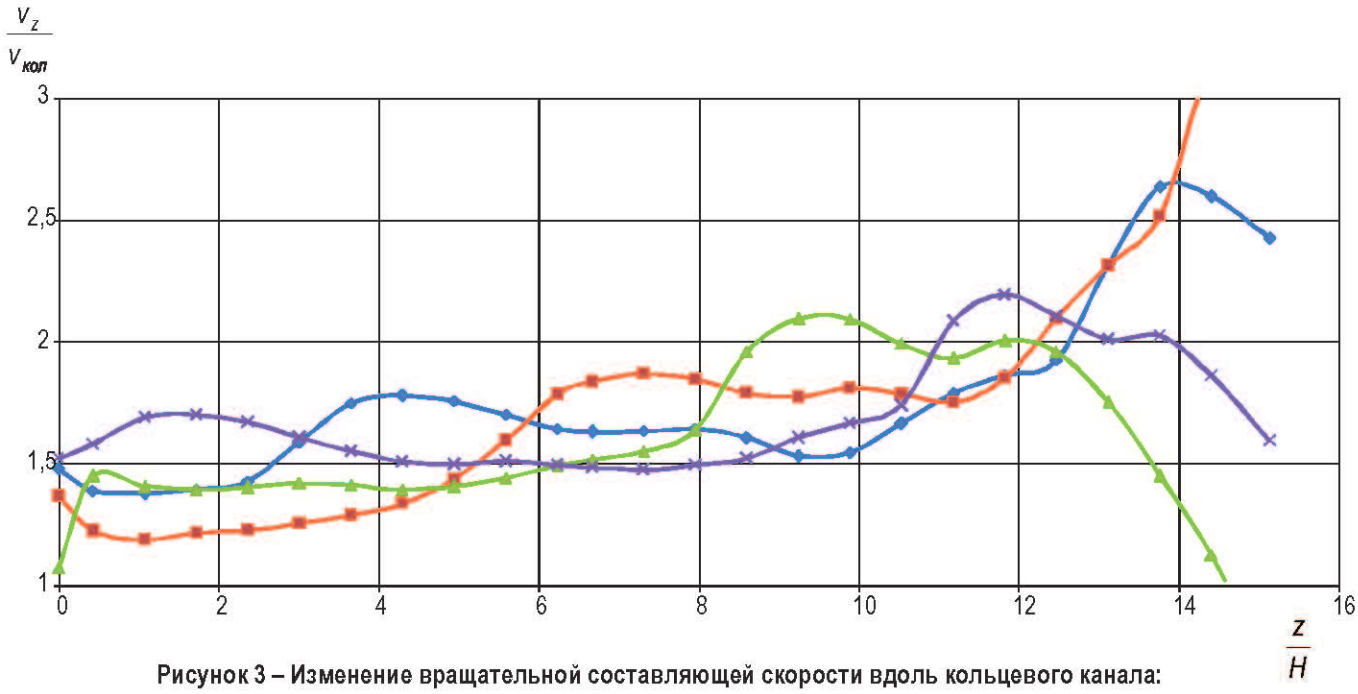

Рисунок 3 – Изменение вращательной составляющей скорости вдоль кольцевого канала:

♦ – φ = 0°, ■ – φ = 90°, ▲ – φ = 180°, × – φ = 270°

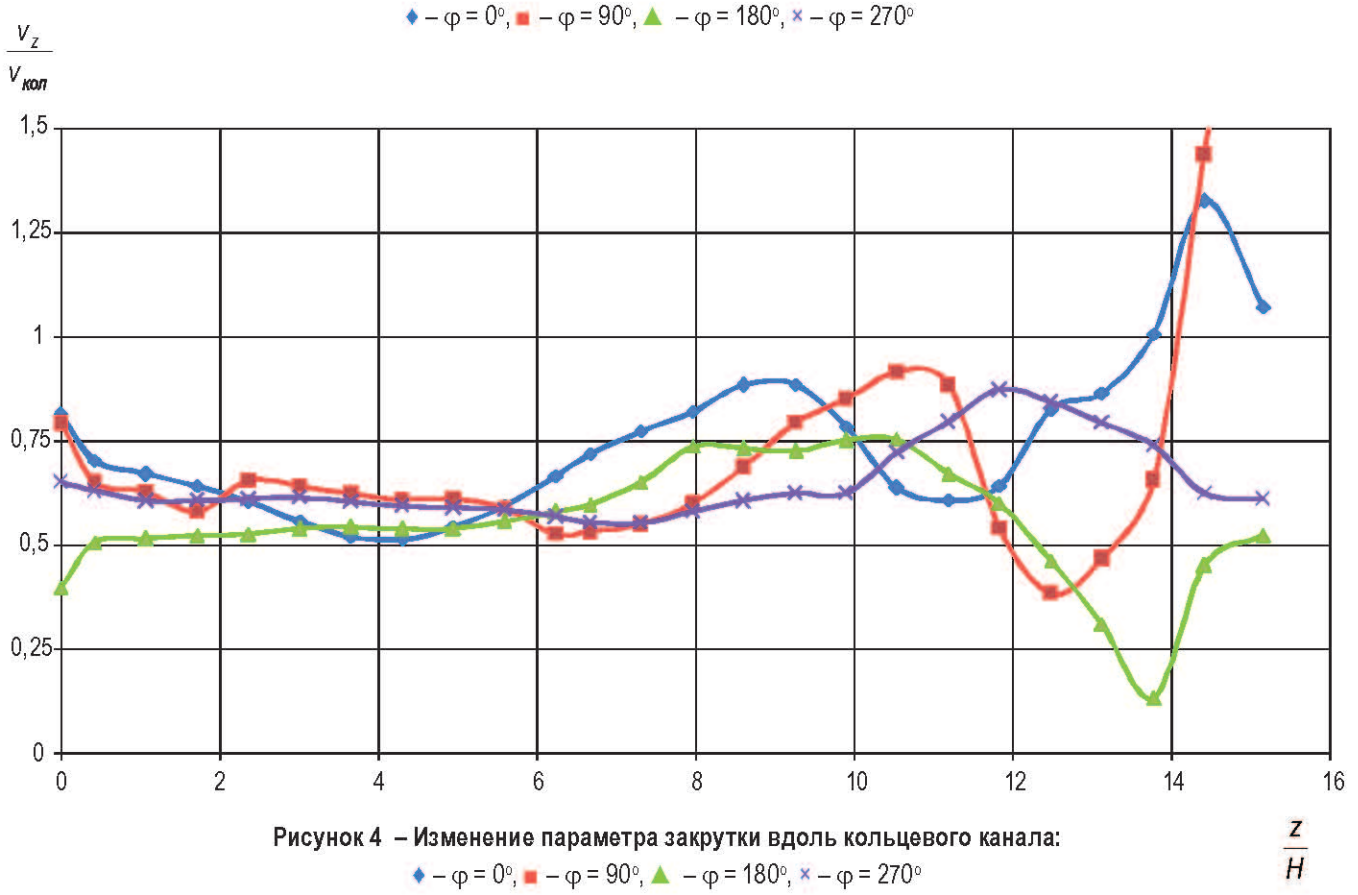

Рисунок 4 – Изменение параметра закрутки вдоль кольцевого канала:

♦ – φ = 0°, ■ – φ = 90°, ▲ – φ = 180°, × – φ = 270°

с линиями тока газового потока, поэтому практически все такие частицы попадают в аппарат. Рост их массы (за счет увеличения размеров и возрастания плотности), а также отношение $u_\infty/v_{кол}$ приводит к тому, что они в меньшей степени подчиняются потоку. Если диаметр собирающего аппарата меньше источника загрязнения (моделировался именно такой случай), то эти частицы пролетают мимо аппарата, что приводит к уменьшению парциального коэффициента захвата. Это обстоятельство нужно учитывать при проектировании аппаратов для улавливания полидисперсных потоков с широким диапазоном плотности пылевых частиц – параметр π_3 необходимо подбирать так, чтобы обеспечивалось эффективное увлечение тяжелых фракций. Тогда для более легких частиц максимальная эффективность будет обеспечена автоматически. Но максимальный за-

хват достигается не при любых π_3. Если свойства пылевых частиц таковы, что парциальный коэффициент захвата определенной фракции неприемлемо низкий (на рис. 5 – это фракции с $\Delta > 80$ мкм и $\rho = 8960$ кг/м^3), то нужно увеличить диаметр аппарата.

Таким образом, по итогам численного моделирования можно сделать вывод, что предложенный принцип аспирации может обеспечить высокую эффективность захвата пылевых частиц, которые выделяет стационарный источник загрязнения. При этом закрученная кольцевая струя, выполняя функцию аэродинамической завесы, способна его локализовать, т.е. отделить загрязненную зону от остального помещения. Такой аппарат может как применяться в системах замкнутой очистки воздуха, так и в некоторых случаях заменить традиционные зонты.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Бутенко, А.Г.** Разработка улавливающего устройства твердых частиц в замкнутой системе очистки [Текст] / А.Г. Бутенко, А.В. Силин // Энергетика и электрификация. – 2007. – № 3. – С. 29–31.
2. **Батурин, В.В.** Аэрация промышленных зданий [Текст] / В.В. Батурин, В.М. Эльтерман. – М. : Госстройиздат, 1963. – 260 с.
3. **Довбуш, О.М.** Влияние воздухоограничителя и цилиндрического борта на повышение эффективности вентиляционного зонта [Текст] / О.М. Довбуш, С.С. Жуковский, О.Т. Возняк // Прикладная гидромеханика, гидромашины и гидропневмоагрегаты. – Вып. 4 (14). – Львов, 2006. – С. 52– 55.

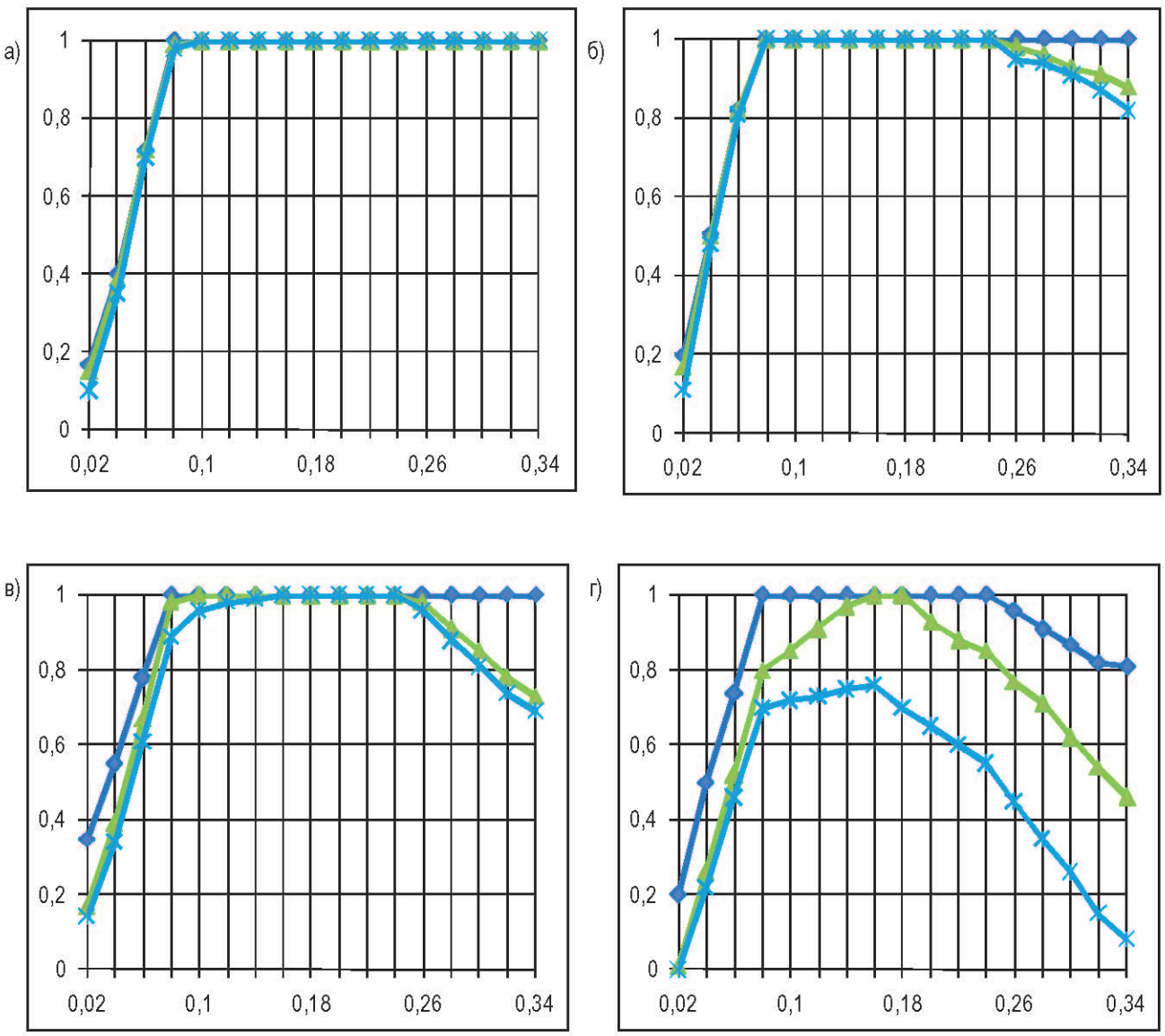

Рисунок 5 – Зависимость парциального коэффициента захвата от отношения скорости загрязненного потока к скорости кольцевой струи на выходе из аппарата при:
а) ♦ = 1 мкм, б) ♦ = 20 мкм, в) ♦ = 40 мкм, г) ♦ = 80 мкм;
× – ρ = 8960 кг/м^3, ▲ – ρ = 4505 кг/м^3, ♦ – ρ = 1075 кг/м^3

4. **Бутенко, А.Г.** Определение правил моделирования двух взаимодействующих осесимметричных неизотермических турбулентных струй [Текст] / А.Г. Бутенко, Е.В. Осипенко // Тр. Одес. политехн. ун-та. – Вып. 1(25) – Одесса, 2006. – С. 193–199.
5. **Алямовский, А.А.** SolidWorks. Компьютерное моделирование в инженерной практике [Текст] / А.А. Алямовский, А.А. Собачкин, Е.В. Одинцов, А.И. Харитонович, Н.Б. Пономарев. – СПб. : ВХВ. – Петербург, 2005. – 800 с.
6. **Ахмедов, Р.Б.** Аэродинамика закрученной струи [Текст] / Р.Б. Ахмедов. – М. : Энергия, 1977. – 240 с.
7. **Халатов, А.А.** Теория и практика закрученных потоков [Текст] / А.А. Халатов. – К. : Научн. мысль, 1989. – 192 с.

Поступила в редакцию 05.11.2007

Проведено дослідження апарату збору забруднених газів для замкнутої системи очищення. Шляхом числового моделювання визначені аеродинамічні та експлуатаційні характеристики, які дозволяють проектувати апарати для умов різних виробництв.

Test of the plant for gathering and cleaning polluted gas in the closed system was performed. With the help of computational modeling aerodynamic and operational characteristics of the plant were determined to provide its designing for various production conditions.