

УДК 621.928.9

Е.Ю. Темникова, А.Р. Богомолов, П.Т. Петрик

## ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЦИКЛОНА С ВНУТРЕННИМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

Значительная часть современных технологических процессов в промышленности связана с изготовлением, переработкой и применением порошкообразных материалов, сопровождающихся интенсивным выделением пыли. С целью создания нормальных санитарно-гигиенических условий труда, предупреждения загрязнения воздушного бассейна, полного и комплексного использования сырья на промышленных предприятиях широко применяют агрегаты и установки для улавливания пыли.

Техника обеспыливания характеризуется большим разнообразием конструкций и форм исполнения обеспыливающего оборудования. Из них особое место занимают сухие инерционные пылеуловители, которые, как правило, имеют простую конструкцию, обладают большой пропускной способностью и несложны в эксплуатации. Ввиду этих преимуществ некоторые виды инерционных пылеуловителей получили широкое распространение и наиболее характерными представителями являются циклоны, в особенности циклоны НИИОГАЗ.

В [1, 2] приводятся некоторые оригинальные конструкции циклонных пылеуловителей, позволяющих по предположению авторов эффективно улавливать мелкодисперсную пыль со степенью

очистки близкой к 100 %. Пылеуловитель представляет собой циклон, корпус которого выполнен из вертикально ориентированных сегментов специального профиля, образующих полусферические уступы, внутри корпуса установлен соосно усеченный конус (обращенный вниз) [1] или обечайка (полый цилиндр) [2], отделяющие пространство у стенок от центральной части. При движении потока за каждым уступом, в зоне пониженного давления, возникает вихревой циркуляционный поток, в который увлекаются мелкодисперсные частицы пыли и постепенно опускаются по образующим корпуса за уступами и дальше попадают в бункер. В связи с этим следует отметить ряд работ, касающихся исследований зон разрежений, возникающих при турбулентных течениях. Работа Марковича Д.И. [3] посвящена решению ряда задач, касающихся ограниченных струйных течений, в том числе экспериментальному исследованию присоединения к близлежащей стенке плоских турбулентных струй несжимаемой жидкости, истекающих параллельно или под углом из сопла над уступом (эффект Коанда). В работе Столера В.Д. [4] решается задача о деформации плоской турбулентной изотермической струи, образованной истечением из сопла, примыкающего к одной из двух взаимноперпендикулярных пло-

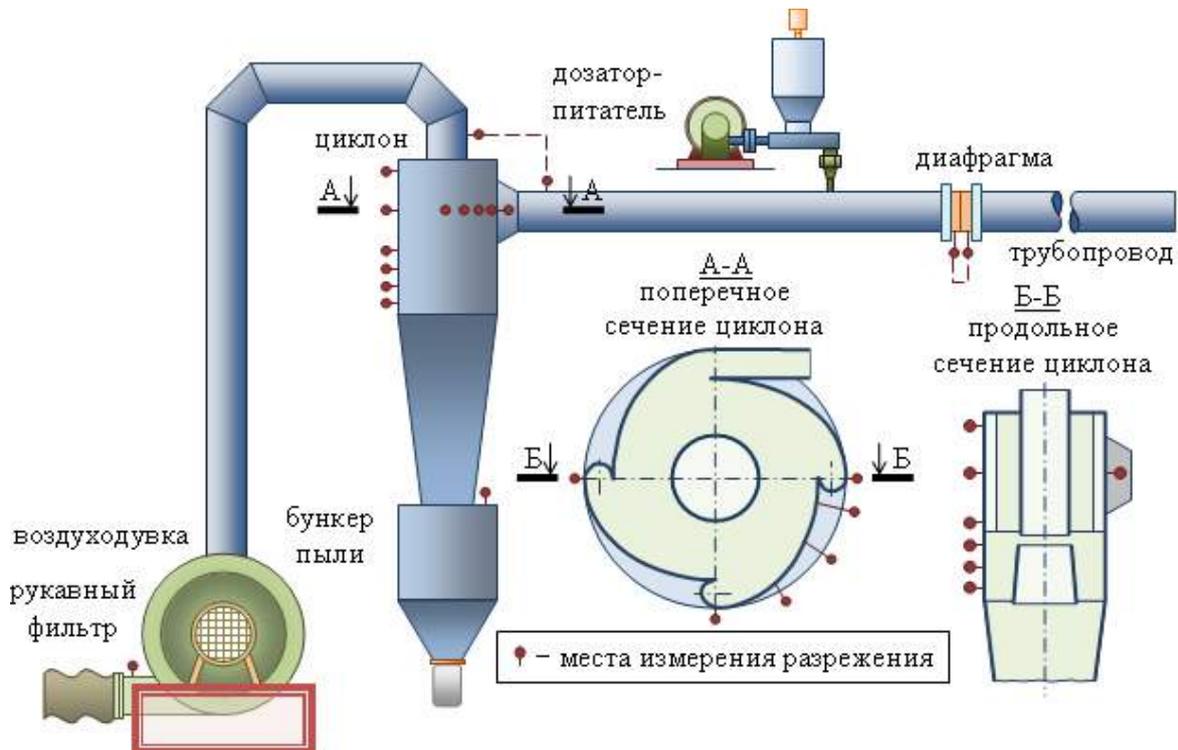


Рис.1. Экспериментальный стенд

ских непроницаемых поверхностей в условиях проявления эффекта Коанда. В циклонных аппаратах характер и структура струи отличается от классической и в первую очередь своим трехмерным течением.

Экспериментальных и теоретических работ по исследованиям отрывных зон закрученных газовых потоков в литературе нами не обнаружено.

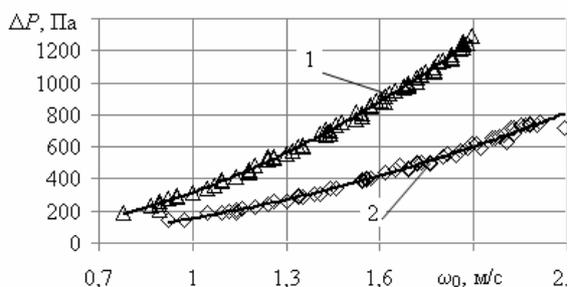


Рис. 2. Зависимость гидравлического сопротивления циклонов от приведенной скорости газа в циклоне: линии, осредняющие экспериментальные данные: 1 – с гладкой цилиндрической стенкой (НИИОГАЗ); 2 – с уступами и конусом в цилиндрической части

Задачей данной работы является экспериментальное изучение некоторых характеристик динамики турбулентной закрученной газовой струи на экспериментальной установке, позволяющей исследовать эффективность пылеуловителя, имеющего зоны разрежения.

Схема экспериментального стенда представлена на рис. 1. При помощи воздуходувки воздух из атмосферы поступает в трубопровод и из спирального дозатора-питателя подается пыль в трубопровод, где она смешивается с воздухом, и полученный аэрозоль вводится тангенциально в верхнюю часть циклона. В циклоне происходит отделение пыли от воздуха. Пыль собирается в бункере, а очищенный воздух выходит через выхлопную трубу циклона и перед выбросом в атмосферу дополнительно проходит через рукавный фильтр. Использовалась пыль установки сухого тушения кокса с насыпной плотностью 661-706 кг/м<sup>3</sup>, дисперсией 1,745-1,697, медианным размером 27,4-36,65 мкм, углом естественного откоса 43,3° и подчиняющейся логарифмически-нормальному закону распределения частиц по размеру [5].

Таблица 1

Тип внутреннего устройства	Эффективность пылеулавливания $\eta$ , %
Полый усеченный конус, обращенный вниз	80-83
Полый цилиндр	96-97
Полый усеченный конус, обращенный вверх	97-99

Таблица 2

Тип циклона	Эффективность пылеулавливания $\eta$ , %	Концентрация пыли в потоке, г/м <sup>3</sup>
Традиционный циклон	99,78	15,9
	99,60	11,8
Циклон с внутренними элементами	99,19	8,60
	99,15	10,7
	99,47	14,9
	98,59	14,4

На циклоне из кварцевого стекла, имеющем уступы, были проведены первичные экспериментальные исследования влияния на эффективность очистки таких конструктивных изменений как установка внутреннего устройства в нижней части цилиндрического корпуса в виде полого усеченного конуса, обращенного вниз, как в [1], и полого цилиндра как в [2] при прочих равных условиях. В табл. 1 представлены результаты измерений, из которых видно, что в данных конструкциях пыль улавливается с низкой эффективностью, в особенности в аппарате с конусом, обращенным вниз. Причины снижения степени очистки были выявлены в результате визуальных наблюдений. При наличии в конструкции циклона полого усеченного конуса, обращенного вниз, в его внутренней части задерживались пылеконцентрированные тороидальные вихри, которые срывались восходящим центральным потоком и при этом пыль перемещалась в уходящий через выхлопную трубу газ. В случае с полым цилиндром наблюдалось аналогичное явление, отличие состояло лишь в том, что срыв вихрей и унос пыли происходили реже. В процессе исследования нами было предложено установить полый усеченный конус, обращенный вверх, что позволило увеличить степень очистки (табл.1).

Для более детальных исследований был разработан циклон, представляющий собой аппарат диаметром 250 мм, соотношения размеров которого относительно диаметра характерны циклону НИИОГАЗ ЦН-15. Кроме того, пылеуловитель имеет внутренние элементы: уступы (каверны), расположенные по образующим цилиндрической части аппарата и ограниченные высотой входного участка, и полый усеченный конус, обращенный вверх и установленный в месте соединения цилиндрической и конической частей циклона, представленные в продольном и поперечном сечениях циклона на рис. 1. Конструктивно пылеуловитель описан в [6].

В ходе исследований проводились измерения эффективности пылеулавливания, расхода воздуха, гидравлического сопротивления, разрежения по высоте цилиндрической части и по окружности.

Эффективность очистки определяли балансовым методом на основе измерения веса загрузен-

ной в питатель пыли, оставшейся в нем и уловленной с точностью до 0,1 г.

Для измерения расхода воздуха использовалась стандартная диафрагма, достоверность измерения которой определили посредством стандартной трубки Пито. Расхождение при различных способах измерений составило 1-3 %.

Измерения гидравлического сопротивления и разрежения в точках измерений, представленных на рис. 1, проводились при помощи U-образных водяных манометров. Погрешность измерения находилась в пределах 2 %.

Некоторые результаты исследований эффективности очистки воздуха в циклоне с внутренними элементами и традиционном аппарате в зависимости от концентрации пыли в газовом потоке приведены в табл. 2, из которой видно, что степень очистки традиционного циклона несколько выше, чем пылеуловителя с внутренними элементами. Однако, результаты измерений гидравлического сопротивления, представленные на рис. 2, показали, что сопротивление циклона с внутренними элементами в 2 раза ниже традиционного при наибольшей эффективности и условной скорости газа 2 м/с. Можно сделать вывод о целесообразности использования циклона с внутренними элементами, так как энергозатраты на пылеочистку в данном случае могут быть гораздо меньше при незначительном снижении эффективности улавливания.

Снижение гидравлического сопротивления, на наш взгляд, объясняется тем, что при движении струи от среза уступа до соприкосновения с боковой стенкой происходит перестройка течения струи.

На рис. 3, а представлены результаты измерения статического разрежения  $P_i$ , на криволинейной стенке циклона. Схема точек измерения, изображенная на рис. 3, б, находится в соответствии со схемой поперечного сечения циклона на рис. 1. Измерения разрежения проводились при скоростях газа  $\omega$  во входном участке равных: 11,6; 16,5 и 17,4 м/с. Исходя из полученных данных, течение струи от среза уступа с близлежащей стенкой в случае прилипания к последней можно условно разделить на три области: на область отрывной зоны 1, переходную область 2 в точке присоединения, область пристенной струи 3, распространяющейся вниз по потоку.

Область отрывной зоны 1 характеризуется постоянством давления на твердой стенке при различных скоростях на входе в циклон. Размер же переходной области 2 определяется из условия повышенного давления по сравнению с отрывной зоной и зоной пристенной струи 3. Положение переходной области соответствует точке присоединения струи, которая характеризуется максимальным значением давления (минимальным разрежением) на стенке.

Экспериментальные данные некоторых исследователей, представленные в [3], показывают снижение статического давления на стенке в области пристенной струи, начиная от точки присоединения. Несмотря на значительные отличия в характере течения закрученной струи от плоской можно отметить также снижение статического давления.

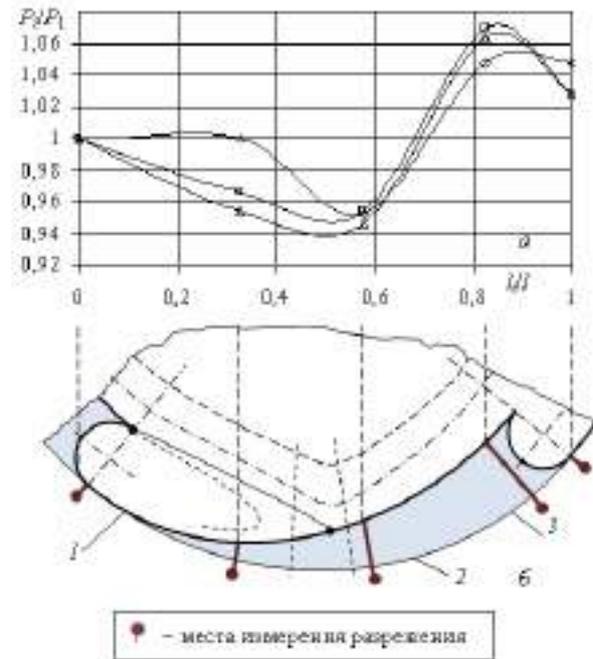


Рис. 3. Распределение статического разрежения на твердой стенке:  
а – безразмерные величины;  
б – схема точек измерений:

◇ –  $\omega = 11,6$  м/с; □ –  $\omega = 16,5$  м/с; Δ –  $\omega = 17,4$  м/с

Хотя промежуток между точками измерений статического разрежения на стенке при течении струи велик, однако из рис. 3 видно, что длина отрывной зоны больше в случае меньшей скорости потока во входном канале. На расстоянии  $l_i/l = 0,33$  разрежение при скорости  $\omega = 11,6$  м/с остается практически такое же, как и на боковой стенке непосредственно за уступом (отрывная зона). Где  $l$  – общая длина близлежащей стенки между уступами, мм;  $l_i$  – длина, отсчитываемая от первого уступа, мм. При скоростях 16,5 и 17,4 м/с разрежение на длине  $0,33l$  значительно меньше разрежения непосредственно за уступом, что соответствует области натекания струи на стенку, и область отрывной зоны смещена влево. Можно предположить, что при скорости 11,6 м/с точка присоединения струи расположена на расстоянии  $(0,4-0,6)l$ .

Из сказанного можно сделать вывод, что область отрывной зоны уменьшается с повышением скорости потока и соответственно переходная область смещается к срезу уступа, а область пристенной струи возрастает.

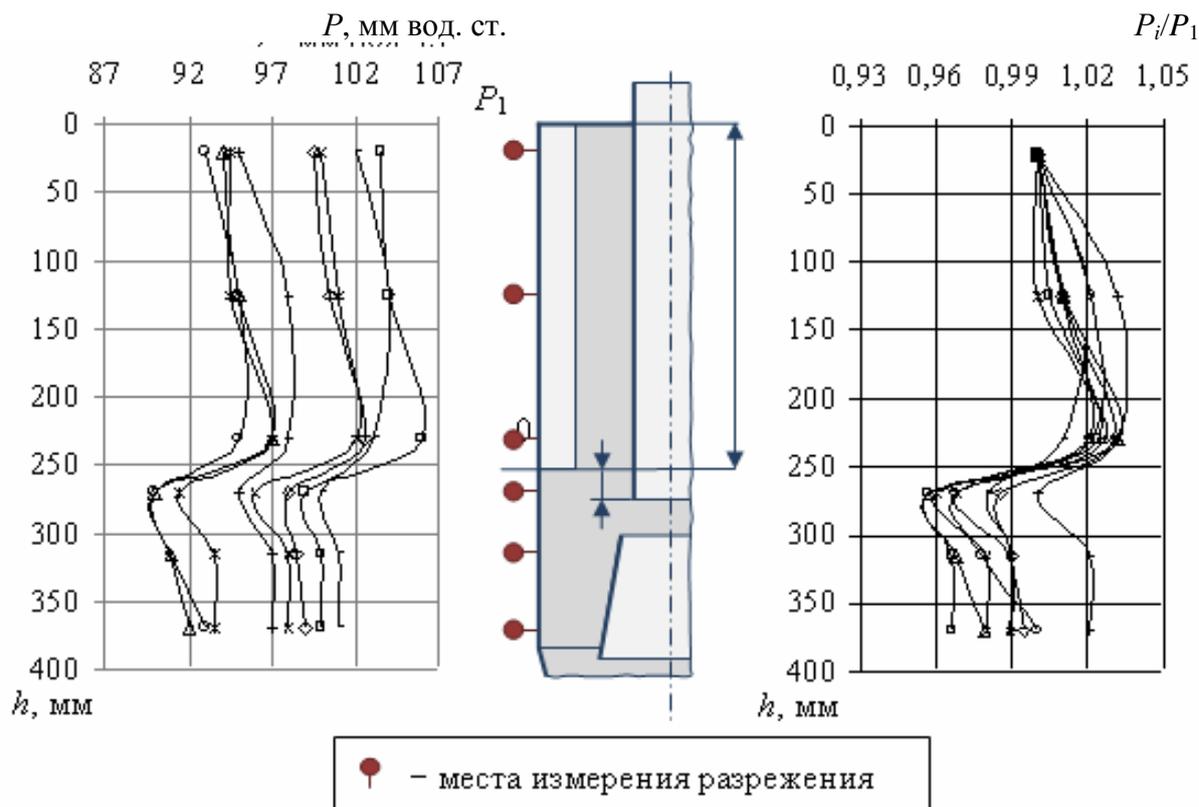


Рис. 4. Распределение статического разрежения по высоте корпуса циклона  $h$  для различных глубин погружения  $h_1$  выхлопной трубы: а – абсолютные значения; б – схема точек измерения; в – безразмерные значения:  $h_1/h_k$ :  $\diamond$  (–0,08);  $\square$  (–0,04);  $\Delta$  (0);  $\times$  (0,04);  $*$  (0,08);  $\circ$  (0,12);  $+$  (0,16);  $-$  (0,2)

Что касается отрывной зоны за следующим уступом, то в ней разрежение на 3-5 % больше, чем в предыдущем. Полагаем, что это связано с влиянием разрежения в области пристенной струи перед уступом. Причем, при скорости потока во входном канале циклона 11,6 м/с разрежение в пристенной струе одинаково с разрежением за уступом. При скорости больше 16,5 м/с разрежение за уступом меньше, чем в области пристенной струи.

На эффективность пылеуловителей циклонного типа оказывают большое влияние вторичные токи (вторичные циркуляционные течения), обусловленные наличием радиального градиента давления и, как следствие, возникновением радиального течения, направленного к оси вращения (радиальный или осевой сток). Верхняя ветвь вихря является кратчайшим путем для выноса пыли в выхлопную трубу. Для ослабления влияния этого течения увеличивают глубину погружения выхлопной трубы.

Были проведены исследования влияния глубины погружения выхлопной трубы на эффективность работы пылеуловителя с внутренними элементами с одновременным измерением разрежения по высоте цилиндрической части циклона (см. рис. 4 и продольное сечение циклона на рис. 1).

Точкой отсчета глубины погружения является нижняя грань уступов и считается положительной

величиной, превышающей длину уступа (направление вниз) и отрицательной – при перемещении выхлопной трубы вверх от нижней грани уступов. Глубина погружения обезразмерена путем отнесения ее абсолютной величины к высоте плоского входного канала  $h_1/h_k$ , где  $h_k$  – высота плоского входного канала, мм;  $h_1$  – глубина погружения выхлопной трубы, мм.

Вращающийся поток формируется от входного участка циклона и время формирования его зависит не только от глубины погружения, но и от площади сечения кольцевого пространства, т.е. от соотношения площадей выхлопной трубы и корпуса циклона  $(d/D)^2$ , где  $D$  – диаметр циклона, мм;  $d$  – диаметр выхлопной трубы, мм. Таким образом, для улучшения работы циклонов необходимо достаточное время формирования вращающегося потока, чтобы перейти частицам пыли из слоев воздуха, опускающихся вдоль выхлопной трубы в более удаленные слои и связанное с этим уменьшение выноса вторичным течением пыли.

Поэтому эффективность пылеуловителя в общем виде зависит от геометрических безразмерных комплексов  $h_1/h_k$  и  $(d/D)^2$ .

На рис. 4, б представлена схема измерения разрежения по высоте  $h$  цилиндрической части циклона и экспериментальные данные этих значений в зависимости от глубины погружения выхлопной трубы при соотношении площадей  $(d/D)^2$

= 0,16 и одинаковой скорости потока на входе  $\omega = 17$  м/с. Из рис. 4, а, в видно, что изменение разрежения по высоте циклона имеет скачкообразный характер с резким уменьшением в зоне, находящейся ниже уступов и дальнейшим небольшим увеличением в области установленного усеченного конуса.

Наибольшая эффективность циклона была достигнута при глубине погружения  $h_1 = 30 \div 40$  мм, что соответствует  $h_1/h_k = 0,12 \div 0,16$ , которую можно принять оптимальной для соотношения  $(d/D)^2 = 0,16$ .

Для глубин погружения выхлопной трубы 30÷40 мм характер изменения разрежения заметно отличается от других случаев. Разрежение в отрывной зоне по высоте уступа резко возрастает в середине высоты уступа, остается затем постоянным в нижней части уступа, а в нижней области установленного конуса разрежение равно или выше разрежения в отрывной зоне самой верхней части корпуса цилиндра.

В других случаях разрежение в нижней части корпуса значительно ниже, чем в верхней его части. Характер изменения разрежения для случая  $h_1/h_k = (0,12 \div 0,16)$  позволяет перемещаться мелкодисперсной пыли, уловленной в отрывных зонах из основного потока, в направлении сборника пыли даже при резком снижении разрежения в зоне под уступом между нижней гранью уступа и верхней частью конуса.

Таким образом, проведены исследования плоской турбулентной закрученной струи, движущейся в циклоне, имеющем уступы, где свободная

струя истекает в присутствии близлежащей криволинейной твердой стенки.

Из результатов измерений эффективностей пылеулавливания в циклоне с внутренними элементами и традиционного циклона НИИОГАЗ видно незначительное преимущество последнего, а измерения гидравлических сопротивлений аппаратов показали, что циклон с внутренними элементами имеет сопротивление в 2 раза ниже, чем традиционный.

Показано, что действие центробежных сил и эжекционное действие струи присоединяют струю к близлежащей стенке, образуя отрывные зоны за уступами с более низким давлением, чем в основном потоке. Такое положение позволяет считать отрывную зону интенсивным фактором для сепарации мелкодисперсной фракции пыли, улавливания ее, и возможность транспортирования в сборник пыли.

Проведены измерения статического давления на близлежащей стенке от одного из уступов при истечении струи, которые показали размеры области отрывной зоны, переходной в точке присоединения и пристенной в зависимости от средней скорости истечения струи. Наблюдается уменьшение длины отрывной зоны с повышением средней скорости струи.

Результаты измерения давления по высоте цилиндрической части циклона позволяют получить оптимальные геометрические размеры расположения внутренних элементов циклона для эффективного пылеулавливания более 99 % мелкодисперсной пыли с низкой кажущейся плотностью.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Завьялов, Ю.И. Нетрадиционное оборудование для очистки газопылевых выбросов в металлургии // Металлообработка. – 2003. - № 1 (13). – С. 36-40.
2. Пат. 2174452 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> В 04 С 5/103. Пылеуловитель / Завьялов Ю.И.; заявитель и патентообладатель ООО «ПЛАНЕТА-К» - № 2000125875/12; заявл. 10.10.00; опубл. 10.10.01. – 5 с.: ил.
3. Маркович, Д. М. Турбулентная струя в ограниченном пространстве: дис. ... к-та физ.-мат. наук: 01.04.14: защищена 28.12.94 - Новосибирск, 1994. – 259 с.
4. Столер, В. Д. Основы организации и расчета вентиляционных процессов, сопровождающихся эффектом Коанда / В. Д. Столер; Уральск. политехн. ин-т им. С. М. Кирова. – Свердловск, 1987. – 138 с. – Деп. в ВИНТИ 16.04.87, № 1317-В87.
5. Богомолов, А. Р. Дисперсность и плотность пылей коксохимических предприятий / А. Р. Богомолов, П. Т. Петрик, Г. С. Пермякова, Е. Ю. Темникова // Химия XXI век: новые технологии, новые продукты: тр. VIII междунар. науч.-практ. конф., Кемерово, 10-15 мая 2005 г. – Кемерово, 2005. С. 107-112.
6. Пат. 2316397 Российская Федерация, МПК<sup>51</sup> В 04 С 5/107. Пылеуловитель мелкодисперсной пыли / Богомолов А. Р., Афанасьев Ю. О., Тихов С. Д., Кошелев Е. А., Петрик П. Т., Темникова Е. Ю.; заявитель и патентообладатель Кузбасс. гос. техн. ун-т. № 2006122092/15; заявл. 20.06.2006; опубл. 10.02.2008, Бюл. № 4. – 9 с.: ил.

□ Авторы статьи:

Темникова  
Елена Юрьевна  
– ст. преподав. каф. процессов, машин и аппаратов химических производств КузГТУ  
Тел.3842-58-10-36

Богомолов  
Александр Романович  
– канд. техн. наук, доцент каф. «Процессы, машины и аппараты химических производств» КузГТУ  
Тел.3842-58-10-36

Петрик  
Павел Трофимович  
– доктор техн. наук, проф., зав. каф. «Процессы, машины и аппараты химических производств» КузГТУ.  
Тел.3842-58-10-36