

## Определение характеристик сварочных искр для расчета их удаления в циклоне

*Д.т.н., профессор, заведующий кафедрой Н.И. Ватин;  
к.т.н., доцент К.И. Стрелец;  
соискатель М.Б. Китаин\**

*ФГБОУ ВПО Санкт-Петербургский государственный политехнический университет*

**Ключевые слова:** искра; гидравлическая крупность; расплавленный металл; сварка

### 1. Использование противоточных циклонов в качестве системы предварительной очистки и искрогашения

При проектировании системы очистки воздуха в инженерных системах промышленных предприятий необходимо учитывать особенности производств, имеющих источники горючей и взрывоопасной пыли (искр). Пожароопасные вещества присутствуют в процессах, реализуемых в нефтяной, газовой, химической, деревообрабатывающей и других отраслях промышленности.

Все мероприятия по обеспыливанию являются одновременно и мерами предупреждения пожаров и взрывов пыли, что обеспечивается устранением возможности концентрирования пыли в воздухе. Однако повреждения, вызываемые искрами, присутствующими в газовом потоке, представляют одну из главных угроз для фильтров в черной металлургии, электросталеплавильной и других отраслях промышленности.

Вода, как известно, относится к лучшим средствам гашения, однако для ряда производств применение «мокрых» систем искрогашения нежелательно, так как существует вероятность отрицательного воздействия воды на фильтрующие элементы [1,2]. Альтернативой является использование противоточного циклона в качестве системы предварительной очистки и искрогашения.

При применении циклона в качестве искрогасителя недопустима возможность вторичного уноса горящих частиц, поэтому наиболее эффективное устройство гашения искр и осаждения тяжелых частиц, которое защищает фильтрующий материал и обеспечивает равномерное перемешивание газового потока, – это противоточный тип циклона [3].

Использование циклонов для искрогашения на стадии предварительной очистки является довольно новой практикой. На данный момент такие предложения уже существуют, однако нет каких-либо исследований по эффективности улавливания горящих частиц, т.е. пыли с содержанием искры. При использовании противоточных циклонов в качестве системы предварительной очистки и искрогашения необходимо определить степень очистки воздуха от пылевых частиц. В случае содержания в пыли искры необходимо удостовериться, что горящие частицы будут полностью удалены в циклоне, т.е. эффективность их удаления на всей высоте циклона составит 100%.

Согласно литературным источникам, в инженерной практике эффективность пылеулавливания циклона выражается критериальной зависимостью:  $\eta_{\omega} = f(Stk; Fr; \xi_{II})$ , а фракционная эффективность равна отношению количества пыли данной фракции, уловленной в аппарате, к количеству входящей пыли той же фракции [4,5,6,7]:

$$\eta = \left( \frac{M_{\text{ул}}^{\phi}}{M_{\text{н}}^{\phi}} \right) \cdot 100 = \frac{\Phi_{\text{ул}} \cdot M_{\text{ул}}}{\Phi_{\text{н}} \cdot M_{\text{н}}} = \eta_0 \frac{\Phi_{\text{ул}}}{\Phi_{\text{н}}},$$

где  $\Phi_{\text{ул}}$  – процентное массовое содержание в газе частиц определенной фракции, уловленных пылеуловителем, отнесенное к массе всего материала,

$\Phi_{\text{н}}$  – процентное массовое содержание в газе частиц определенной фракции до его поступления в пылеуловитель, отнесенное к массе всего материала.

В методиках определения эффективности циклонов Шиляева М.И. и его последователей [8] расчет циклонов основан на использовании эмпирических вероятностных функций, описывающих фракционную эффективность пылеулавливания. Вычисляется эффективность улавливания частиц в рамках возможности применения формулы Стокса, и с учетом поправок для частиц, к которым нельзя применять формулу Стокса.

В обоих случаях в основу расчета вводятся данные о диаметре удаляемых частиц [8].

При расчете эффективности очистки воздуха в противоточном циклоне с использованием модели турбулентной диффузии с конечной скоростью [9,10] в качестве основной характеристики пыли используется не диаметр, а гидравлическая крупность частиц [11,12], т.е. скорость их свободного падения.

Ватин Н.И., Стрелец К.И., Китаин М.Б. Определение характеристик сварочных искр для расчета их удаления в циклоне

Для определения эффективности пылеулавливания по этой методике необходимы точные характеристики пыли, содержащей горящие частицы. Однако для различных производственных условий характеристики выделяющейся пыли можно достоверно определить только опытным путем [12].

Целью данной работы является разработка методики опытного определения свойств пыли, содержащей горящие частицы, в производственных условиях. Для получения информации о характеристиках такой пыли авторами была проведена серия экспериментальных исследований. Опыты были проведены для металлических частиц пыли, выделяющихся при сварочном производстве и содержащих сварочную искру.

Под выделением сварочной искры мы понимаем разбрызгивание электродного металла, которое является следствием газодинамического удара, возникающего при испарении перемишки между сварочной проволокой и каплей.

Разбрызгивание в основном оценивается как нежелательный технический фактор, вызывающий, например, неэффективный расход сварочной проволоки, заваривание брызгами сварочных мундштуков, приваривание брызг на свариваемый материал с необходимостью его зачистки, а также как опасный производственный фактор, приводящий к ожогам, и пожароопасный фактор.

Разбрызгивание металла как источник металлической пыли, содержащей вредные вещества, до настоящего времени не рассматривалось. В то время как брызги размером в сотые и десятые доли миллиметра уже являются промышленной пылью и при скорости воздуха 0,2–0,3 м/с свободно перемещаются в пространстве производственных помещений. Брызги размером от 0,1 мм до 3 мм могут захватываться местными вытяжными устройствами и транспортироваться по воздуховодам (ГОСТ 12.4.052-78. Ткани и материалы для спецодежды и средств защиты рук. Методы определения стойкости к прожиганию).

Содержание вредных веществ в сварочных брызгах соответствует химическому составу применяемых сварочных материалов. Основной компонент сварочных материалов – железо – в соответствии с ГОСТ 12.4.052-78 относится к третьему классу токсичности.

## 2. Определение размерности и количества сварочной искры

К характеристикам сварочной искры относится множество параметров, таких как дальность разлета, диаметр, температура, масса, время затухания, скорость и т.д. Все параметры зависят от условий сварки и определяются экспериментальным путем.

Характеристики сварочной искры должны определяться в установившемся режиме работы, близком к режиму максимального искрообразования.

Для определения параметров сварочной искры, для наглядного отображения последствий сварки применен метод с использованием фильтровальной ткани. Схема установки представлена на рис. 1.

На рис. 2 представлено распределение прожогов фильтровальной ткани на расстоянии 200 мм от сварочной горелки. В эксперименте определено распределение брызг вокруг сварочной горелки по расположенной около неё поверхности горючего полиэфирного нетканого материала:

- непосредственно под сварочной горелкой над листом 500x500 мм;
- под сварочным столом высотой 760 мм над листом шириной 1000 мм и длиной 2000 мм.

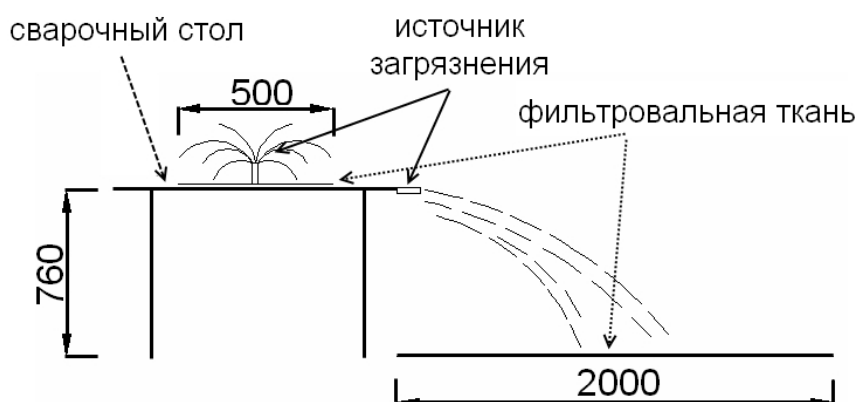


Рисунок 1. Схема проведения эксперимента по определению диаметра частиц

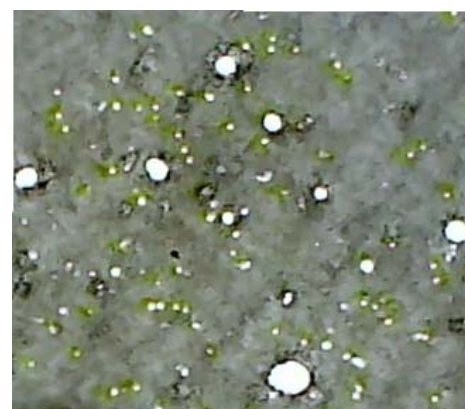


Рисунок 2. Следы прожога каплями металла нетканого полиэфирного фильтрующего материала на расстоянии 200 мм от сварочной горелки

Предварительно в эксперименте определена температура полного оплавления ткани, равная (без загорания) +400°C, и температура оплавления ткани с коксованием краев оплавления, равная +600°C.

В круге под горелкой диаметром 0,4 м, площадью 0,125 м<sup>2</sup> при расходе 26,4 грамм сварочной проволоки за 45 секунд зафиксировано 760 точек проплавления материала круглой формы диаметром от 0,3 до 6 мм, из которых 92% приходится на отверстия, проплавленные каплями диаметром от 0,3 до 1 мм, с температурой +400°C, и 8% – на отверстия, проплавленные каплями размером более 1 мм и температурой более +600°C.

При обработке результатов первого испытания лист фильтровальной бумаги был разделен на 8 секторов, и было подсчитано количество прожогов в каждом секторе в радиусе 0,1 м и 0,2 м от места сварки (табл. 1)

**Таблица 1. Количество прожогов в каждом секторе при первом испытании**

	Кол-во	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	Итого
Радиус 0,1 м	Прожогов	26	54	60	33	41	70	46	40	370
	Прожогов с обугливанием краев	3	2	8	2	5	9	1	2	30
Радиус 0,2 м	Прожогов	14	24	40	27	61	78	57	33	334
	Прожогов с обугливанием краев	1	2	4	2	7	8	5	2	31

Фильтровальную ткань размерами 0,5 м на 0,5 м за 45 секунд прожигает более 700 искр, причем оставляют обугленные края более 60.

При анализе результатов второго испытания лист разделили на 10 частей по 0,2 м и подсчитали количество прожогов в каждой части листа (табл. 2).

**Таблица 2. Количество прожогов в каждом секторе при первом испытании**

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	Итого
Расстояние от места сварки	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0	
Кол-во прожогов	336	550	235	108	62	33	11	11	6	7	1359
Кол-во прожогов Ø более 3 мм	73	141	33	12	6	2	0	3	1	1	270
Плотность (кол-во прожогов на м <sup>2</sup> )	1680	2750	1175	540	310	165	55	55	30	35	6795

Фильтровальную ткань размерами 1 м на 2 м за 45 секунд прожигает порядка 1359 искр, причем диаметром более 3 мм – 270 искр.

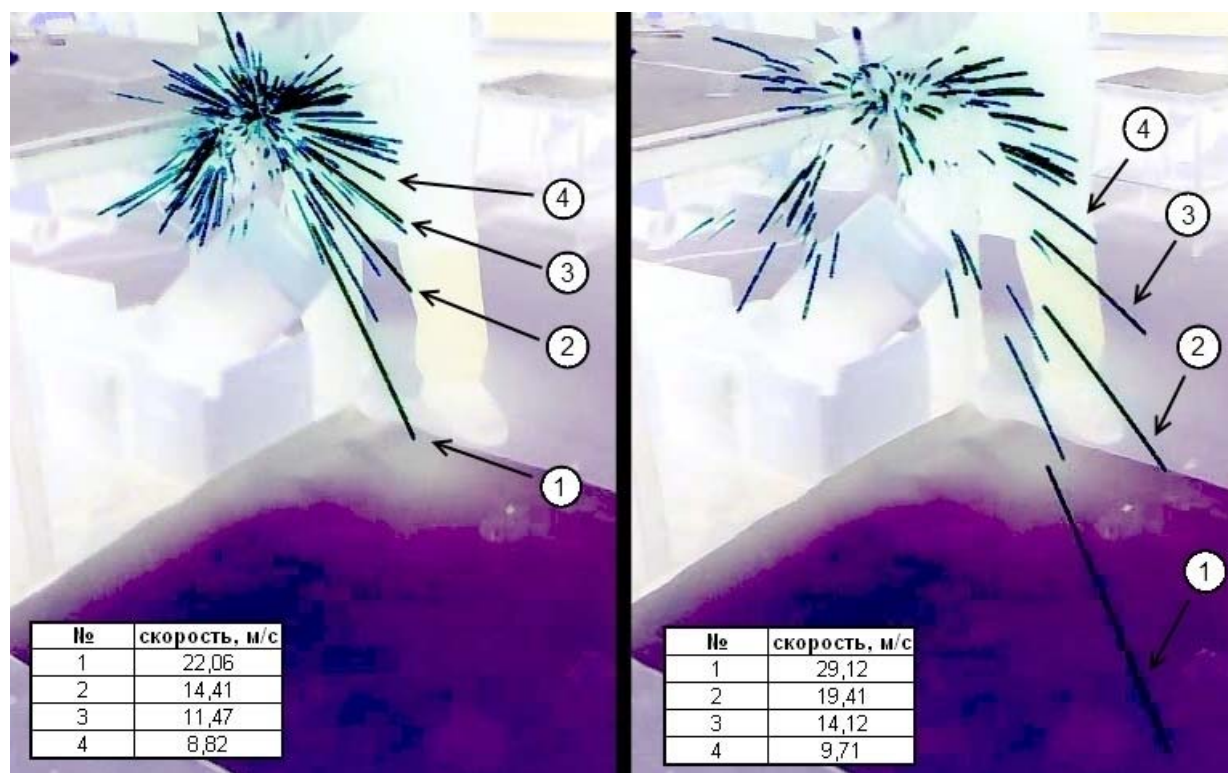
Из таблицы видно, что основной разлет брызг металла приходится на дистанцию до одного метра (максимум на 0,4 м) от точки сварки. Отдельные высокотемпературные брызги отлетают на расстояние до 2 метров.

Для получения информации о размерах, дальности полета и температуре брызг нами была проведена серия экспериментов.

1. Методом компьютерной обработки материалов видеосъемки процесса сварки определены скорость вылета брызг металла от сварочной горелки и скорость свободного падения брызг металла с высоты 2,8 м.
2. Методом определения стойкости к прожиганию нетканого фильтрующего полиэфирного материала по аналогии с ГОСТ 12.4.052-78 определены дальность полета, плотность потока и температура брызг.

В качестве источника брызг металла использована полуавтоматическая сварка проволокой в защитной среде – смесь аргона с CO<sub>2</sub> проволокой Св08ГЗС диаметром 0,8 мм при токе 120 А, напряжении 19,8 В. Скорость подачи проволоки 6,6 м/мин. Время сварки 45–50 с.

На рис. 3 представлена компьютерная обработка кадра видеосъемки сварки продолжительностью 0,034 с.



**Рисунок 3. Компьютерная обработка кадра видеосъемки сварки**

Основная масса брызг вылетает из сварочной горелки с начальной скоростью 4,12–8,82 м/с. Скорость полета отдельных брызг от сварочной горелки превышала 20 м/с. Такие искры при угле подъема 45 градусов могут отлететь от горелки на расстояние 1,7 и более метров.

Результаты экспериментов показывают следующее:

- основная масса брызг вылетает из сварочной горелки с начальной скоростью 4,12–8,82 м/с;
- основной разлет брызг металла приходится на дистанцию до одного метра (максимум на 0,4 м) от точки сварки;
- отдельные брызги могут отлететь от горелки на расстояние 1,7 и более метров;
- средний размер свободно падающих брызг примерно равен 0,05 мм (50 мкм);
- брызги с температурой +400°C диаметром от 0,3 до 1 мм составляют 10% массы разбрызгиваемого металла;
- брызги с температурой более +600°C размером более 1 мм составляют 90% массы разбрызгиваемого металла.

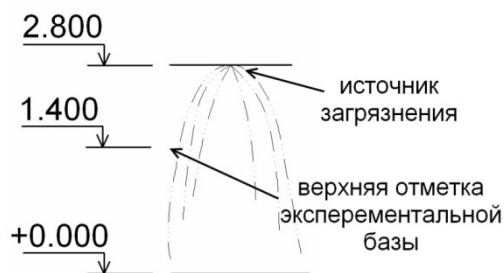
Так как воздухоприемные устройства по условиям их эффективной работы располагаются на расстоянии 0,25–0,40 м от сварочной дуги при скорости всасывания 0,3 м/с, то практически все брызги размером до 1 мм и крупнее, выбрасываемые в сторону воронки вытяжного устройства, могут захватываться в систему удаления и очистки пыли. Скорости транспортировки 16 м/с достаточно для того, чтобы брызги долетели до фильтровальной ткани (она должна быть в 2–2,5 раза больше скорости витания наиболее крупных частиц).

### 3. Определение гидравлической крупности искр

Поскольку большинство частиц являются «горящими», при определении их диаметра наблюдаются значительные погрешности, вследствие того, что они представляют собой частицу и присоединенный кислород. Формы частиц зачастую далеки от сферических. В связи с этим предложено использовать в качестве основной характеристики частиц их гидравлическую крупность [11,12], т.е. скорость свободного падения.

Для определения средней скорости падения сварочной искры использован метод сварки с высоты. Схема установки представлена на рис. 4. Перед проведением опыта была задана база, с верхней отметкой 1,4 м. В качестве нижней отметки был принят уровень пола. Чтобы движение частицы было равномерно, необходимо поднять источник выделения частиц над верхней отметкой базы на уровень, необходимый, чтобы погасить ускорение частицы. Была выбрана высота источника частиц 2,8 м. С отметки 2,8 м производилась сварка с защитой аргон плюс CO<sub>2</sub>. Диаметр стальной проволоки 0,8 мм. Сила тока 120 А, напряжение 19,8 В. Сварка длилась 50 секунд со скоростью 6,6 м/мин. Таким образом, было израсходовано 5,5 м проволоки.

Ватин Н.И., Стрелец К.И., Китаин М.Б. Определение характеристик сварочных искр для расчета их удаления в циклоне



В результате проведенных исследований была определена гидравлическая крупность частиц.

На рис. 5 представлена компьютерная обработка треков свободного падения (гидравлической крупности) раскаленных частиц. Для устранения влияния скорости вылета частиц от дуги, сварочная дуга поднята на высоту 2,8 м. База регистрации частиц установлена на высоте от 0 до 1,45 м от уровня пола, где выравнивалась скорость свободного падения раскаленных брызг. Результаты измерения гравитационной гидравлической крупности в раскаленных брызг приведены в табл. 3.

Рисунок 4. Схема проведения эксперимента по определению гидравлической крупности частиц

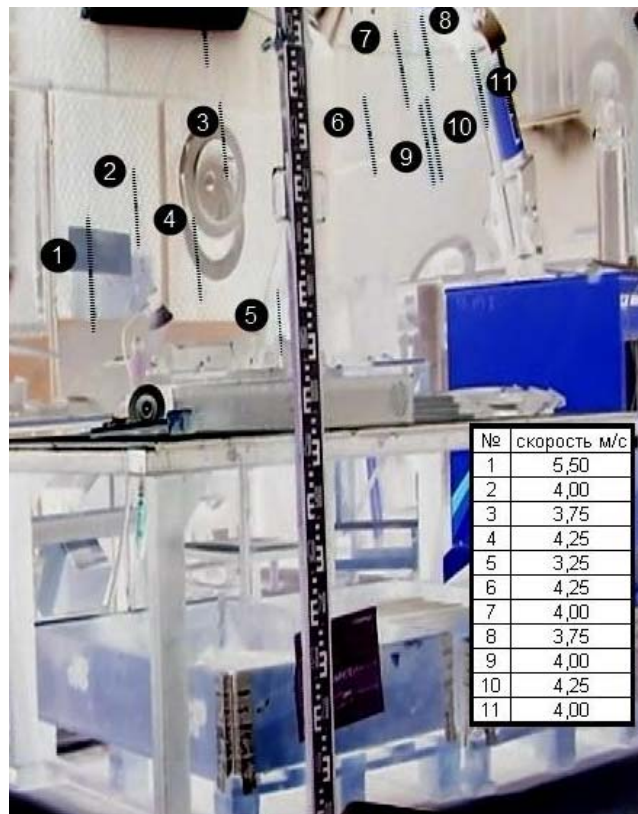


Рисунок 5. Компьютерная обработка трасс свободного падения раскаленных брызг металла продолжительностью 0,04 с

Таблица 3. Определение скорости свободного падения – гравитационной гидравлической крупности брызг металла

№ изм	w, м/с	№ изм	w, м/с	№ изм	w, м/с	№ изм	w, м/с	№ изм	w, м/с
1	6,25	11	4,38	21	4,00	31	3,83	41	2,95
2	3,75	12	5,50	22	4,69	32	4,25	42	3,50
3	6,00	13	4,00	23	5,00	33	5,00	43	5,83
4	4,50	14	3,75	24	5,08	34	4,75	44	4,38
5	3,50	15	4,25	25	4,64	35	4,25	45	3,94
6	3,61	16	4,25	26	5,17	36	4,75	46	5,13
7	5,42	17	4,00	27	4,06	37	3,50	47	4,93
8	4,06	18	3,75	28	3,38	38	5,75	48	4,06
9	3,75	19	4,00	29	3,45	39	4,25	49	3,72
10	3,89	20	4,25	30	3,30	40	3,75	50	6,64
<b>w<sub>ср</sub></b>	<b>4,41</b>	<b>w<sub>ср</sub></b>	<b>4,21</b>	<b>w<sub>ср</sub></b>	<b>4,41</b>	<b>w<sub>ср</sub></b>	<b>4,57</b>	<b>w<sub>ср</sub></b>	<b>4,38</b>
<b>w<sub>ср</sub></b>	<b>4,4 м/с</b>								

Средняя скорость падения 4,4 м/с. Среднеквадратическое отклонение 0,62, что составляет 12%.

Точность измерения времени, как для экспериментов в случае использования секундомера, следует принять 0,5 сек, а в случае компьютерной обработки материалов видео съемки – 0,1 сек. Следует учитывать, что свойства частиц будут различны для различных производств, в зависимости от индивидуальных особенностей сварочного оборудования, материалов и технологии сварки.

Полученные средние значения мало отличаются друг от друга в различных сериях опытов, среднеквадратическое отклонение составляет не более 15%. Таким образом, методика определения гидравлической крупности  $w$ , описанная выше, представляется вполне реализуемой в производственных условиях и не требующей специального оборудования и подготовки персонала для проведения опыта.

### Выводы

Полученные в ходе проведенных опытов характеристики сварочной пыли могут быть использованы для расчета эффективности пылеудаления в циклоне с использованием различных методик.

Однако при использовании данных о диаметре горящих частиц следует вводить поправку на тот факт, что диаметр прожогов может превышать реальный диаметр частицы из-за обугливания краев. Гидродинамические характеристики (масса, характер взаимодействия с окружающей средой, эффективный диаметр) при движении горячей частицы также изменяются.

Гидравлическая крупность, определяемая во второй серии опытов, интегрально учитывает все эти факторы и может быть использована для расчета циклонов по методике, основанной на модели турбулентной диффузии с конечной скоростью [11,12]. Предложенная методика расчета гидравлической крупности достаточно проста для реализации в производственных условиях

### Литература

1. Солодкий С. А. Брунов О. Г. Влияние газодинамического удара на разбрызгивание электродного металла при сварке в активных газах // Современная техника и технологии : труды Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Томск, 26–30 марта 2007 г. С. 363-365.
2. Федько В. Т. Теория, технология и средства снижения набрызгивания и трудоемкости при сварке в углекислом газе. Томск : Изд-во Том. ун-та, 1998. 432 с.
3. Ватин Н. И., Чечевичкин В. Н., Чечевичкин А. В. Особенности сорбционно-каталитической очистки воздуха в помещениях обитания человека в условиях крупных городов // Инженерно-строительный журнал. 2011. №1(19). С. 24-27.
4. Hoffmann A. C., Stein L. E. Gas Cyclones and Swirl Tubes. Berlin ; Heidelberg : Springer-Verl., 2002. 421 p.
5. Syeda Noori Banu P., Syeda Arshi Banu P.. Simulation and empirical modeling of a Design of Cyclonic separator to combat air pollution // International Journal of Engineering Science and Technology. 2011. Vol. 3. No. 6. Pp. 4857-4878.
6. Zhongchao Tan. Mechanism of particle separation in aerodynamic air cleaning : PhD. Illinois : Urbana, 2004. 14 p.
7. Ужов В. Н. и др. Очистка промышленных газов в металлургии. М. : Химия, 1981. 312 с.
8. Шияев М. И., Шияев А. М., Грищенко Е. П. Методы расчета пылеуловителей : учеб. пособие для студ. вузов. Томск : Изд-во ТГАСУ, 2006. 384 с.
9. Гиргидов А. Д. Турбулентная диффузия с конечной скоростью / СПбГТУ. СПб., 1996. 259 с.
10. Стрелец К. И. Оценка эффективности осаждения частиц в циклонах пылеудаления в циклоне // Вестник гражданских инженеров. 2010. № 4. С. 138-143.
11. Стрелец К. И. Численное решение уравнений турбулентной диффузии в закрученном потоке газа // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2010. №5 (108). С. 156-160.
12. Стрелец К. И. О характеристиках пыли, используемых при расчете эффективности пылеудаления в циклоне // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2010. № 110. С. 222-226.

*\*Михаил Борисович Китаин, Санкт-Петербург, Россия*

*Тел. раб.: +7(812)335-00-33; эл. почта: kmb777@gmail.com*

## Determination of welding spark parameters for cyclone efficiency calculation

**N.I. Vatin;  
K.I. Strelets;  
M.B. Kitain,**

*Saint-Petersburg State Polytechnical University, Saint-Petersburg, Russia,  
+7(812)535-46-10; e-mail: arefiev@cef.spbstu.ru*

### Key words

spark; free-falling velocity; melt metal splash; welding

### Abstract

Importance of the current work is explained by the problem of air purification in the field of breath of the worker and prevention of the fire and the explosion. To solve this problem the authors offer to use Reverse-flow cyclone as precleaner with spark extinguishing option.

In case if the dust includes sparks it is very important to insure that the particles with the sparks will be totally collected in the cyclone, so the collection efficiency for such particles will be 100% in the cyclone. For the estimation of the efficiency of gas purification from the dust particles in the cyclones dust particles features should be determinate, that can be done with the satisfactory accuracy only by physical modeling results.

The amount of physical experiments was made by the authors. The methods of determination of the geometric diameter and hydraulic size of the particle consisting sparks were offered.

The experimental researches showed that the accuracy of using the geometric diameter of such particle is not enough, because the hydrodynamic characteristics of the particles (such as weight, effective diameter, the way of interaction with the environment) can be change in the case of moving. At the same time hydraulic size, determined in the second part of the experiment, consider all these factors and can be used for the estimation of the cyclone efficiency based on the model of turbulent diffusion with the limited velocity.

### References

1. Solodskiy S. A. Brunov O. G. *Sovremennye tekhnika i tekhnologii : trudy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchennykh* [Modern technics and technology : proceedings]. Tomsk, 26-30 marta 2007 g. Pp. 363-365. (rus)
2. Fedko V. T. *Teoriya, tekhnologiya i sredstva snizheniya nabryzgvaniya i trudoemkosti pri svarke v uglekislom gaze* [Theory, technology and means for decreasing of splashing and laboriousness under carbon dioxide welding]. Tomsk : Izd-vo Tom. un-ta, 1998. 432 p. (rus)
3. Vatin N. I., Chechevichkin V. N., Chechevichkin A. V. *Magazine of Civil Engineering*. 2011. No. 1(19). p. 24-27. (rus)
4. Hoffmann A. C., Stein L. E. *Gas Cyclones and Swirl Tubes*. Berlin, Heidelberg, Springer-Verl, 2002. 421 p.
5. Syeda Noori Banu P., Syeda Arshi Banu P. Simulation and empirical modeling of a Design of Cyclonic separator to combat air pollution. *International Journal of Engineering Science and Technology*. 2011. Vol. 3. No. 6. Pp. 4857-4878.
6. Zhongchao Tan. *Mechanism of particle separation in aerodynamic air cleaning* : PhD. Illinois : Urbana, 2004. 14 p.
7. Uzhov V. N. and others. *Ochistka promyshlennykh gazov v metallurgii* [Industry gas cleaning in metallurgy]. Moscow : Khimiya, 1981. 312 p. (rus)
8. Shilyaev M. I., Shilyaev A. M., Grishchenko E. P. *Metody rascheta pyleuloviteley* : ucheb. posobie dlya stud. vuzov [Calculation methods of dust collectors : manual for students]. Tomsk : Izd-vo TGASU, 2006. 384 p. (rus)
9. Girgidov A. D. *Turbulentnaya diffuziya s konechnoy skorostyu* [Turbulent diffusion of finite velocity] / SPbGTU. SPb. , 1996. 259 p. (rus)
10. Strelets K. I. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov*. 2010. No. 4. Pp. 138-143. (rus)
11. Strelets K. I. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbGPU*. 2010. No. 5 (108). Pp. 156-160. (rus)
12. Strelets K. I. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbGPU*. 2010. No. 110. Pp. 222-226. (rus)

**Full text of this article in Russian: pp. 25-30**