

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ЦИКЛОНА

Л. М. Виноградский, А. А. Комаров, В. Л. Мирошников

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» ИЛФИ, г. Саров Нижегородской обл.

При проведении экспериментов на лазерной установке в газовом тракте наблюдалось образование капель непосредственно в зоне генерации, что снижает стабильность работы лазера. Причиной образования капель могут быть центры конденсации из частиц пыли, которые могут находиться во внутреннем объеме лазера. Кроме того, сама пыль может оказывать влияние на стабильность работы лазерной установки (загрязнение оптики, тракта и т. д.) [1].

Для улавливания частиц пыли было предложено использовать устройство-циклон, которое позволяет улавливать твердые частицы, в том числе капли, которые загрязняют газовую смесь [2]. Целью выполнения данной работы является проверка эффективности работы циклона, способного улавливать твердые примеси из газовой среды лазера.

Циклон является наиболее распространенным видом газоочистного оборудования. Широкое использование циклонов объясняется простотой их конструкции, надежностью в эксплуатации. Корпус циклона имеет разборную конструкцию для возможности промывки внутренних полостей. Принцип действия циклонов основан на выделении частиц пыли из газового потока под воздействием центробежных сил, возникающих вследствие вращения потока в корпусе аппарата (рис 1). Внешний вид циклона приведен на рис. 2.

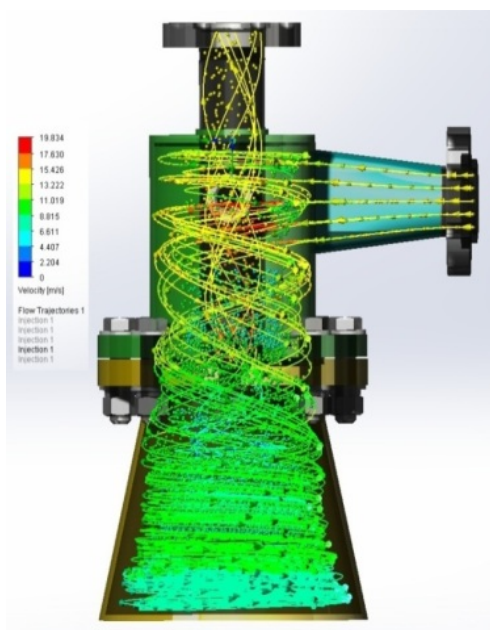


Рис. 1. Принцип действия циклона



Рис. 2. Внешний вид циклона

Основным параметром работы циклона является эффективность удаления примесей при различных скоростях движения газовой среды. Для испытания циклона был разработан экспериментальный стенд, принципиальная схема которого представлена на рис. 3.

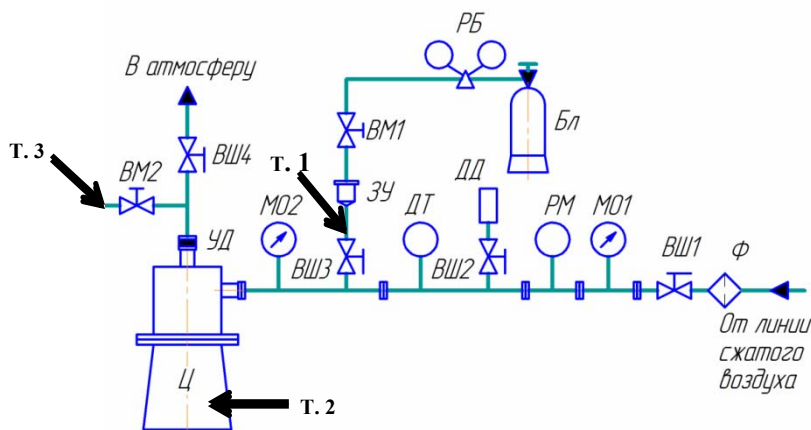


Рис. 3. Принципиальная схема стенда отработки циклона: ВМ1, ВМ2 – вентиль; ВШ1...ВШ4 – вентиль шаровой; МО1, МО2 – манометр образцовый; РМ – расходомер; ДД – датчик давления; ДТ – датчик температуры; ЗУ – грузозачное устройство; УД – узел диафрагменный; Ц – циклон; РБ –редуктор баллонный; Бл – баллон, Ф – фильтр ФС-КС-1-128/П1-60

До проведения экспериментов по определению эффективности циклона, внутренний объем стенда продувается сжатым воздухом при расходе 50 м³/час на протяжении 5 часов для получения стабильности состава газовой среды по примесям. Очистка воздуха на входе в стенд осуществлялась фильтром ФС-КС-1-128/П1-60. Параметры фильтра приведены в таблице 1.

Таблица 1

Параметры фильтра ФС-КС-1-128/П1-60.

Параметры фильтрующего газа	Значения
Избыточное рабочее давление в газовой линии	не более 8 атм.
Температура	до плюс 80 °С
Механические примеси	не более 1 мг/м ³
Размер твердых частиц	не более 5 мкм
Масло, вода (в жидком состоянии)	не допускаются
Эффективность очистки от частиц размером более 0,01 мкм	Более 99,999 %

После продувки измерялась запыленность газовой среды, подаваемого в стенд из централизованной магистрали при различных расходах сжатого воздуха (10,30,50,75 м³/час). Измерение проводилось в двух точках – до циклона (Т.1) и после (Т.3). Используя вентиль шаровой ВШ1 (рис. 3), осуществлялась регулировка давления сжатого воздуха в магистрали, что позволяло получать расход сжатого воздуха в пределах от 10 ... 75 м³/час при н.у. На вход стенда из централизованной магистрали подавался сжатый воздух под давлением до 10 атм., который проходил через расходомер (РМ), датчик давления (ДД), температуры (ДТ) и поступал в циклон (Ц). На выходе из циклона устанавливался аэрозольный счетчик частиц, работающий по принципу измерения интенсивности рассеянного света, который измерял запыленность воздуха в различных точках стенда.

Прибор позволяет измерять концентрацию частиц в диапазоне от 0,3 до 10 мкм. В соответствии с требованиями стандарта ГОСТ ИСО 14644-3-2002, минимальный объем пробы должен составлять 2 л, а минимальное время отбора пробы – 1 мин [3, 4]. В нашем случае, время одного измерения равнялось 2,25 мин, а объем пробы составил 6,84 л.

В данных опытах определялась эффективность работы циклона по очистке от частиц размерами от 0,3 ... 10 мкм. Результаты измерений запыленности исходного воздуха до (С_{вх}) и после (С_{вых}) циклона при различных расходах приведены в табл. 2, на основе которых по формуле (1.1) проводился расчет эффективности работы циклона.

Эффективность работы циклона (η) при различных потоках подачи сжатого воздуха определялась по формуле: (1.1)

$$\eta = \frac{C_{\text{вх}} - C_{\text{вых}}}{C_{\text{вх}}} \cdot 100 \% \quad (1.1)$$

Таблица 2

Запыленность сжатого воздуха и эффективность работы циклона

Размерность, мкм	10 м ³ /час			30 м ³ /час			50 м ³ /час			75 м ³ /час		
	С _{вх} , м ³	С _{вых} , м ³	η , %	С _{вх} , м ³	С _{вых} , м ³	η , %	С _{вх} , м ³	С _{вых} , м ³	η , %	С _{вх} , м ³	С _{вых} , м ³	η , %
0,3	5,7E+05	1,7E+05	70	6,7E+06	2,6E+06	61	8,0E+06	2,2E+06	72	1,0E+08	4,6E+06	95
0,5	1,1E+04	6,8E+03	38	3,5E+04	1,2E+04	65	5,6E+05	3,7E+05	34	2,6E+07	9,0E+05	96
1,0	2,1E+03	3,0E+02	85	1,6E+03	1,1E+03	31	6,1E+04	5,6E+04	8	5,1E+06	1,2E+05	98
3,0	0	0	0	0	0	0	3,6E+03	5,0E+02	86	9,5E+04	1,7E+03	98
5,0	0	0	0	0	0	0	1,8E+03	1,4E+02	92	2,0E+04	2,1E+02	99
10,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Из полученных результатов следует, что в исходном сжатом воздухе после фильтра, полностью отсутствуют частицы размером 3,0 и более мкм при расходе от 10 до 30 м³/час. Сувеличением расхода сжатого воздуха 50 до 75 м³/час, появляется проскок через фильтр частиц размерами от 3,0 мкм и более. Эффективность работы циклона при этом составляет от 86...99 % (табл.2).

Далее определялась эффективность работы циклона при работе с частицами из различных материалов, при этом работа стенда проходит в следующей последовательности. На вход стенда из централизованной магистрали подавался сжатый воздух под давлением до 10 атм., который проходил через расходомер (РМ), датчик давления (ДД), температуры (ДТ) и поступал в циклон (Ц). Перед входом в циклон находилось загрузочное устройство (ЗУ), с помощью которого осуществлялся сброс частиц различных размеров в поток воздуха из магистрали. На выходе из циклона был установлен пылеулавливающий мешочек, куда попадали пролетевшие через циклон частицы. Количество частиц контролировалось в трех точках, а их количество измерялось весовым (с помощью весов) или визуальными методами (подсчет количества).

В точке 1 (Т.1) (вход в циклон) определялось исходное количество примесей путем взвешивания или подсчета количества частиц. В точке 2 (Т.2) (бункер пыли циклона) определялось количество улавливаемых частиц (вес, штуки). В точке 3 (Т.3) (выход циклона) измеряется количество частиц, которые пролетели через циклон.

Исследование эффективности циклона проводилось в 3 этапа при различных расходах сжатого воздуха (10,30,50,75 м³/час). Перед проведением серии опытов с различными размерами частиц, циклон разбирался, протирались внутренняя поверхность спиртовым раствором, а также продувался сжатым воздухом его бункер от остаточных частиц. На первом этапе работы проводились с твердыми частицами стекла, на втором с порошками карбида кремния, на третьем с порошками MgO и Fe₂O₃.

На первом этапе количество частиц стекла различных размеров (0,5...4,0 мм), которые бросались в поток из загрузочного устройства, определялось с помощью визуального подсчета количества частиц. Далее частицы стекла помещали в загрузочное устройство, где под действием давления сжатого воздуха из магистрали, частицы попадали на вход циклона. Одна часть частиц стекла оседала в бункере циклона, а другая собиралась на выходе циклона в мешочек. После проведения опытов, циклон разбирался, частицы стекла из бункера и мешочка подсчитывались. Результаты опытов приведены в таблице 3 и по формуле (1.2) проводился расчет эффективности работы циклона. Эффективность работы циклона (η) при различных потоках подачи сжатого воздуха определялась по формуле: (1.2)

$$\eta = \frac{C_{\text{уд}}}{C_{\text{вх}}} \cdot 100 \% \quad \text{или} \quad \eta = \frac{C_{\text{вх}} - C_{\text{вых}}}{C_{\text{вх}}} \cdot 100 \% \quad (1.2)$$

На втором и третьем этапах, используя весовой метод, брались мерные количества частиц порошка, которые взвешивались на весах (точность взвешивания 0,01 г). Затем частицы порошка помещали в загрузочное устройство ($C_{\text{вх}}$). Под действием давления сжатого воздуха из баллона (рис. 3), частицы попадали на вход циклона. Одна часть частиц оседала в бункере циклона ($C_{\text{ул}}$), а другая собиралась на выходе циклона в мешочек ($C_{\text{вых}}$). После проведения опытов, циклон разбирался, частицы порошка из бункера и мешочка взвешивались (табл. 3–5) и по формуле (1.2) определялась эффективность работы циклона.

Таблица 3

Эффективность работы циклона при работе со стеклом

Номер опыта	Материал	Размерность	Плотность, г/см ³	Расход, м ³ /ч	$C_{\text{вх}}$, г	$C_{\text{ул}}$, г	$C_{\text{вых}}$, г	η , %
1	Стекло	0,5–1 мм	2,3	10	20	20	0	100
				30	20	20	0	100
				50	20	20	0	100
				75	20	20	0	100
2		2–3 мм		10	20	20	0	100
				30	20	20	0	100
				50	20	20	0	100
				75	20	20	0	100
3		3–4 мм		10	20	20	0	100
				30	20	20	0	100
				50	20	20	0	100
				75	20	20	0	100

Таблица 4

Эффективность работы циклона при использовании карбида кремния

Номер опыта	Материал	Размерность	Плотность, г/см ³	Расход, м ³ /ч	$C_{\text{вх}}$, г	$C_{\text{ул}}$, г	$C_{\text{вых}}$, г	η , %
1	Карбид кремния	20 мкм	3,2	10	3,0	3,0	0	100
				30	3,3	3,14	0,16	95
				50	3,14	2,94	0,2	94
				75	3,0	2,8	0,2	93
2		40 мкм		10	3,0	2,8	0,2	93
				30	3,0	2,88	0,12	96
				50	3,0	2,95	0,05	98
				75	3,0	2,96	0,04	98
3		60 мкм		10	3,0	2,88	0,12	96
				30	3,0	2,88	0,12	96
				50	3,0	2,95	0,05	98
				75	3,0	2,97	0,03	99
4		80 мкм		10	3,0	2,8	0,2	93
				30	3,0	3,0	0	100
				50	3,0	3,0	0	100
				75	3,0	3,0	0	100

Эффективность работы циклона при использовании порошков MgO, Fe₂O₃

Номер опыта	Материал	Размерность	Плотность, г/см ³	Расход, м ³ /час	C _{вх} , г	C _{ул} , г	C _{вых} , г	η, %
1	MgO	6,1 мкм	3,5	10	2,0	1,51	0,49	75
				30	2,0	1,68	0,32	84
				50	2,0	1,98	0,02	99
				75	2,0	1,97	0,03	98
2	Fe ₂ O ₃	10,5 мкм	5,2	10	2,0	1,78	0,22	89
				30	2,0	1,9	0,1	95
				50	2,0	1,88	0,12	94
				75	2,0	1,9	0,1	95

Таким образом, на основе проведенных экспериментов можно сделать заключение, что циклон эффективно (84...100 %) улавливает твердые частицы в диапазоне от 0,5 до 4 мм и от 6,1 до 80 мкм при газовом потоке 10...75 м³/час.

Далее, с использованием счетчика аэрозольных частиц был исследован состав пыли, которая наблюдалась в виде облака на выходе из циклона при работе с порошками MgO и Fe₂O₃. Эксперименты проводились в следующей последовательности: на начальном этапе определялась загрязненность исходного воздуха на выходе из циклона. Для этого внутренний объем стенда продувался сжатым воздухом при расходе 75 м³/час на протяжении 5 часов до установления стабильного состава примесей. Счетчик аэрозольных частиц устанавливался непосредственно на выходе из циклона, вместо мешочка. Результаты измерений приведены в табл. 6.

Таблица 6

Исходная запыленность воздуха

Размерность	Количество частиц, м ³		
	Опыт 1	Опыт 2	Ср. значение*
0,3	1,8E+07	1,8E+07	1,8E+07
0,5	9,8E+05	9,4E+05	9,6E+05
1,0	2,3E+05	2,4E+05	2,3E+05
3,0	4,7E+04	5,0E+04	4,9E+04
5,0	3,7E+04	3,6E+04	3,7E+04
10,0	5936	6502	6219

Затем на вход в циклон через загрузочное устройство вбрасывался исследуемый порошок (MgO, Fe₂O₃) и измерялась запыленность воздуха на выходе из циклона (табл. 7, 8). По разности количества частиц в облаке пыли за циклоном и исходном воздухе определялось количество частиц пролетевших через циклон.

Таблица 7

Запыленность среды за циклоном (MgO)

Размерность	Количество частиц, м ³		
	Опыт	Ср. значение*	Δ
0,3	3,8E+08	1,8E+07	3,6E+08
0,5	2,0E+08	9,6E+05	2,0E+08
1,0	9,8E+07	2,3E+05	9,8E+07
3,0	7,2E+06	4,9E+04	7,1E+06
5,0	2,5E+06	3,7E+04	2,5E+06
10,0	143604	6219	137385

Запыленность среды за циклоном (Fe_2O_3)

Размерность	Количество частиц, м ³		
	Опыт	Ср. значение*	Δ
0,3	4,4E+08	1,8E+07	4,2E+08
0,5	4,5E+08	9,6E+05	4,5E+08
1,0	3,6E+08	2,3E+05	3,5E+08
3,0	2,4E+07	4,9E+04	2,3E+07
5,0	5,6E+06	3,7E+04	5,6E+06
10,0	116749	6219	110530

Как следует из полученных результатов, наибольшее количество частиц наблюдается в диапазоне от 0,3...1,0 мкм, что и создает эффект пылевого облака.

Согласно паспортным данным порошки (MgO , Fe_2O_3) содержат основное количество частиц размером 6,1 мкм (MgO) и 10,5 мкм (Fe_2O_3), а также более мелкие и крупные примеси. Для определения спектра частиц, которые улавливались циклоном и пролетали через него, были исследованы образцы порошков в исходном состоянии и образцы, которые находились в бункере циклона. Частицы вещества насыпали на чашку Петри, которую затем помещали под микроскоп.

Перемещая платформу микроскопа с помощью подвижек, выбирались частицы вещества из видимой области, которые необходимо было измерить. Размер величины, на которую перемещалась платформа, определялась с помощью прибора. Изображение с микроскопа выводилось на экран монитора с помощью программы. На рис. 4, 5 изображены частицы вещества Fe_2O_3 до и после циклона под микроскопом с увеличением 20х. Результаты состава проб по размерам частиц приведены в табл. 9.

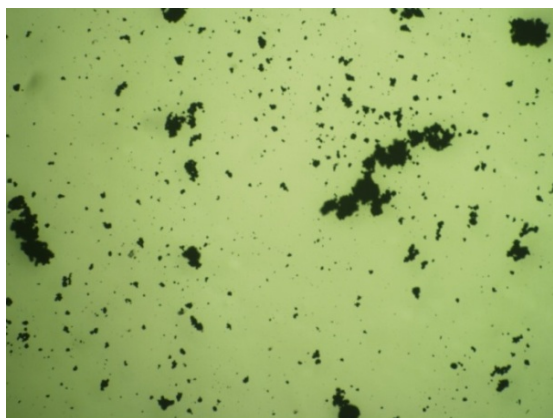
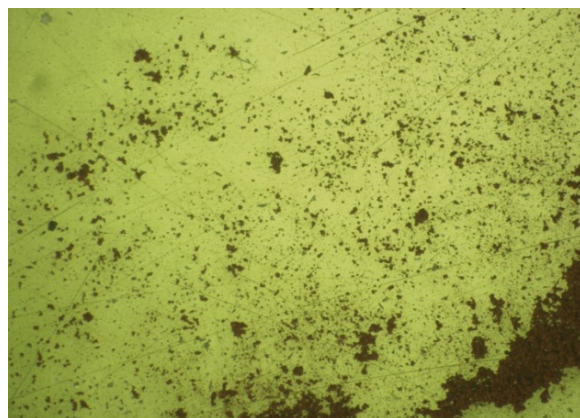
Рис. 4. До циклона Fe_2O_3 Рис. 5. После циклона Fe_2O_3

Таблица 9

Результаты определения состава проб вещества Fe_2O_3

Fe_2O_3	Размер частицы, мкм														
Исходный	1,1	1,2	1,5	1,6	1,8	2,4	2,7	3,7	5,5	6	7,8	9	10,5	17,5	23,8
Бункер циклона	1,1	1,2	1,5	1,6	1,8	2,4	2,7	3,7	5,5	6	7,8	9	10,5	17,5	23,8

На рис. 6, 7 изображены частицы вещества MgO до и после циклона под микроскопом с увеличением 20х. Результаты состава проб по размерам приведены в табл. 10.

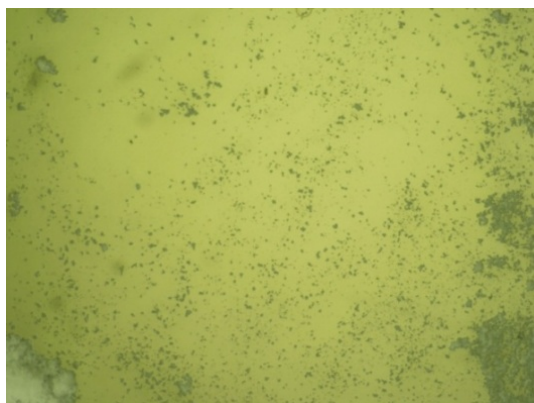


Рис. 6. До циклона MgO

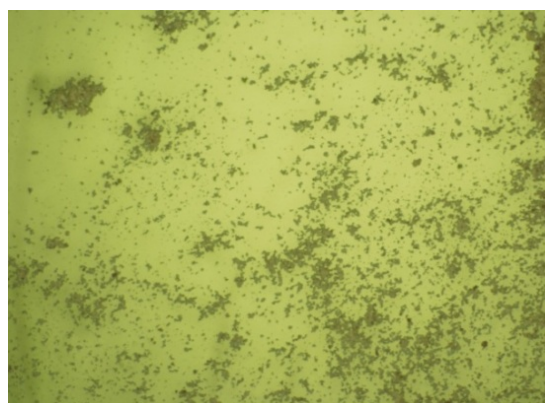


Рис. 7. После циклона MgO

Таблица 10

Результаты определения состава проб вещества MgO

MgO	Размер частицы, мкм														
Исходный	1,3	1,5	2	2,1	2,3	2,5	3,7	4,6	5,2	6,1	7,2	8	13	14,5	17,7
Бункер циклона	1,3	1,5	2	2,1	2,3	2,5	3,7	4,6	5,2	6,1	7,2	8	13	14,5	17,7

Как показали результаты исследования фракционного состава, во всех образцах порошков присутствуют частицы следующих размеров:

- Fe₂O₃ – от 1,1...23,8 мкм (табл. 9);
- MgO – от 1,3...17,7 мкм (табл. 10).

Данный факт свидетельствует о том, что циклон эффективно работает в диапазоне улавливаемых частиц от 1,1...23,8 мкм. Размеры пролетающих через циклон частиц в основном находятся в диапазоне 0,3...1,0 мкм (табл. 7,8).

Из полученных результатов можно сделать следующие выводы:

1. Проведены исследования эффективности работы циклона при работе с частицами из различных материалов при потоке сжатого воздуха 10...75 м³/час:

- Стекло (от 0,5 до 4 мм) – эффективность работы циклона составляет 100 %;
- Карбид кремния (от 20 до 80 мкм) – эффективность работы циклона составляет 93...100 %;
- Порошок MgO (6,1 мкм) – эффективность работы циклона составляет 75...99 %;
- Порошок Fe₂O₃ (10,5 мкм) – эффективность работы циклона составляет 89...95 %;

2. Максимальная эффективность циклона (100 %) достигается при работе с частицами стекла от 0,5 до 4 мм;

3. При работе с порошками MgO и Fe₂O₃ через циклон в основном наблюдается проскок частиц размером 0,3...1,0 мкм (~5*10⁸ част/м³);

4. Проведены исследования фракционного состава порошков MgO и Fe₂O₃ в исходном состоянии и после улавливания в бункере. Показано, что исследуемый циклон позволяет улавливать частицы MgO и Fe₂O₃ в диапазоне ~1,1...23,8 мкм;

5. Данную конструкцию циклона можно рекомендовать для использования в составе лазерной установки, для очистки газовой среды от загрязняющих веществ в диапазоне от 1,0 мкм до 4 мм при газовом потоке в пределах 10...75 м³/час.

Список литературы

1. Стрелец К. И., Ковалев А. А., Ватин Н. И. Очистка промышленных газов: XXX Юбилейная неделя науки СПбГТУ, 2002. С. 99.
2. Страус В. Промышленная очистка газов. М.: Химия, 1981.
3. ГОСТ Р ИСО 14644-3-2002 «Чистые помещения и связанные с ними контролируемые среды. Ч. 1. Классификация чистоты воздуха». М.: Издательство стандартов, 2003. С. 43
4. ГОСТ Р ИСО 14644-3-2007 «Чистые помещения и связанные с ними контролируемые среды. Ч. 3. Методы испытаний». М.: Стандартиформ, 2008. С. 50