# ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ЦИКЛОНА

Л. М. Виноградский, <u>А. А. Комаров</u>, В. Л. Мирошников

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

При проведении экспериментов на лазерной установке в газовом тракте наблюдалось образование капель щелочного металла 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 щелочного металла, 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 и внешний вид которого представлены на рис. 3 и 4.

До проведения экспериментов по определению эффективности циклона, внутренний объем стенда продувается сжатым воздухом при расходе 50 м<sup>3</sup>/ч на протяжении 5 ч 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 табл. 1.



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 – загрузочное устройство; УД – узел диафрагменный; Ц – циклон; РБ – редуктор баллонный; Бл – баллон, Ф – фильтр ФС-КС-1-128/П1-60



Рис. 4. Внешний вид стенда отработки циклона: 1 – циклон; 2 – загрузочное устройство; 3 – датчик температуры; 4 – датчик давления; 5 – расходомер; 6 – анализатор пыли, 7 – магистраль подачи воздуха

Таблица 1

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 <sup>3</sup>
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 %

## Параметры фильтра ФС-КС-1-128/П1-60

После продувки измерялась запыленность газовой среды, подаваемого в стенд из централизованной магистрали при различных расходах сжатого воздуха (10, 30, 50, 75 м<sup>3</sup>/ч). Измерение проводилось в двух точках-до циклона (Т.1) и после (Т.3). Используя вентиль шаровой ВШ1 (рис. 3), осуществлялась регулировка давление сжатого воздуха в магистрали, что позволяло получать расход сжатого воздуха в пределах от 10...75 м<sup>3</sup>/ч при н.у. На вход стенда из централизованной магистрали подавался сжатый воздух под давлением до 10 атм., который проходил через расходомер (5), датчик давления (4), температуры (3) и поступал в циклон (1). На выходе из циклона устанавливал-

ся аэрозольный счетчик частиц TSI AeroTrak 9306 (рис. 5), 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 составляет 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  $(C_{\rm BX})$  и после  $(C_{\rm Bbix})$  циклона при различных расходах приведены в табл. 2, на основе которых по формуле (1.1) проводился расчет эффективности работы циклона.

10,0

0

0

0

0

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

$$\eta = \frac{C_{\rm BX} - C_{\rm BbIX}}{C_{\rm BX}} \cdot 100\%.$$
(1.1)

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 м<sup>3</sup>/ч. С увеличением расхода сжатого воздуха с 50 до 75 м<sup>3</sup>/ч, появляется проскок через фильтр частиц размерами от 3,0 мкм и более. Эффективность работы циклона при этом составляет от 86...99 % (табл. 2).

Таблица 2

0

0

10 м<sup>3</sup>/ч 30 м<sup>3</sup>/ч 50 м<sup>3</sup>/ч 75 м<sup>3</sup>/ч Размерность.  $C_{\rm BX}$ ,  $M^3$  $C_{\rm BX}$ ,  ${\rm m}^3$  $C_{\rm BX}$ ,  ${\rm m}^3$  $C_{\rm BX}$ ,  ${\rm m}^3$  $C_{\rm BMX}, \, {\rm m}^3$  $C_{\rm вых}$ , м<sup>3</sup>  $C_{\rm BMX}, \, {\rm m}^3$  $C_{\rm BMX}$ ,  $m^3$ η, % η, % η, % ŋ, % мкм 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 2,1E+03 1.0 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 5.0E+02 3,0 0 0 3.6E+03 86 9,5E+04 1.7E+03 98 0 0 0 0 5.0 0 0 0 0 0 0 1.8E+03 1,4E+0292 2.0E+04 2,1E+02 99

0

0

0

0

0

0

Запыленность сжатого воздуха и эффективность работы циклона

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 (5), датчик давления (4), температуры (3) и поступал в циклон (1). Перед входом в циклон находилось загрузочное устройство (2), с помощью которого осуществлялся вброс 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 (весы Kern EG4200-2NM) или визуальным 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 (рис. 7).

Исследование эффективности циклона проводилось в 3 этапа при различных расходах сжатого воздуха (10, 30, 50, 75 м<sup>3</sup>/ч). Перед проведением серии опытов с различными размерами частиц,

91



циклон разбирался, протиралась 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 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

На первом этапе количество частиц стекла различных размеров (0,5...4,0 мм), которые вбрасывались 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 табл. 3 и по формуле (1.2) проводился расчет эффективности работы циклона.

Эффективность работы циклона (η) при различных потоках подачи сжатого воздуха определялось по формуле (1.2):

$$\eta = \frac{C_{y_{\Pi}}}{C_{BX}} \cdot 100\%$$
 или  $\eta = \frac{C_{BX} - C_{BbIX}}{C_{BX}} \cdot 100\%.$  (1.2)

На втором и третьем этапах, используя весовой метод, брались мерные количества частиц порошка, которые взвешивались на весах Kern EG4200-2NM (точность взвешивания 0,01 г). Затем частицы порошка помещали в загрузочное устройство  $(C_{\rm BX})$ . Под действием давления сжатого воздуха из баллона (рис. 3), частицы попадали на вход циклона. Одна часть частиц оседала в бункере циклона  $(C_{\rm yn})$ , а другая собиралась на выходе циклона в мешочек  $(C_{\rm Bbix})$ . 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

Номер опыта	Материал	Размерность	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Расход, м <sup>3</sup> /ч	<i>С</i> <sub>вх</sub> , г	<i>С</i> <sub>ул</sub> , г	<i>С</i> <sub>вых</sub> , г	η, %		
				10	20	20	0	100		
1		0.5 1		30	20	20	0	100		
1		0,5-1 мм		50	20	20	0	100		
				75	20	20	0	100		
		2-3 мм	2,3	10	20	20	0	100		
2	Стекло			2,3	2,3	30	20	20	0	100
2						2,5	2,5	50	20	20
				75	20	20	0	100		
				10	20	20	0	100		
3		2 4		30	20	20	0	100		
		3-4 MM		50	20	20	0	100		
				75	20	20	0	100		

Эффективность работы циклона при работе со стеклом

Таблица 4

		•	, <b>1</b>		•			
Номер опыта	Материал	Размерность	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Расход, м <sup>3</sup> /ч	<i>С</i> <sub>вх</sub> , г	<i>С</i> <sub>ул</sub> , г	<i>С</i> <sub>вых</sub> , г	η, %
				10	3,0	3,0	0	100
1		20 мкм		30	3,3	3,14	0,16	95
1		20 MKM		50	3,14	2,94	0,2	94
				75	3,0	2,8	0,2	93
				10	3,0	2,8	0,2	93
2				30	3,0	2,88	0,12	96
2	2 40 мкм Карбид кремния 3 60 мкм	3,2		50	3,0	2,95	0,05	98
				75	3,0	2,96	0,04	98
				10	3,0	2,88	0,12	96
2			60		30	3,0	2,88	0,12
3		OO MKM		50	3,0	2,95	0,05	98
				75	3,0	2,97	0,03	99
		80 мкм		10	3,0	2,8	0,2	93
4	4			30	3,0	3,0	0	100
4				50	3,0	3,0	0	100
				75	3,0	3,0	0	100

Эффективность работы циклона при использовании карбида кремния

### Таблица 5

Эффективность работы циклона при использовании порошков MgO, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

Номер опыта	Материал	Размерность	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Расход, м <sup>3</sup> /час	<i>С</i> <sub>вх</sub> , г	<i>С</i> <sub>ул</sub> , г	$C_{\rm BMX},\ г$	η, %
			10	2,0	1,51	0,49	75	
1 MgO	MaO	61,000	2.5	30	2,0	1,68	0,32	84
	MgO	0,1 МКМ	3,3	50	2,0	1,98	0,02	99
				75	2,0	1,97	0,03	98
				10	2,0	1,78	0,22	89
2	E. O	<sub>2</sub> O <sub>3</sub> 10,5 мкм	5,2	30	2,0	1,9	0,1	95
2	$\Gamma e_2 O_3$			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 м<sup>3</sup>/ч.

Далее, с использованием счетчика аэрозольных частиц (рис. 5) был исследован состав пыли, которая наблюдалась в виде облака на выходе из циклона при работе с порошками MgO и Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. 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 м<sup>3</sup>/ч на протяжении 5 ч до установления стабильного состава примесей. Счетчик аэрозольных частиц устанавливался непосредственно на выходе из циклона, вместо мешочка. Результаты измерений приведены в табл. 6.

Depueption	Ко.	личество части	ац, м <sup>3</sup>
газмерность	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

#### Исходная запыленность воздуха

Затем на вход в циклон через загрузочное устройство вбрасывался исследуемый порошок (MgO,  $Fe_2O_3$ ) 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

Depugnugar	Количество частиц, м <sup>3</sup>								
газмерность	Опыт	Ср. значение*	$\Delta$						
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 (MgO)

### Таблица 8

Dopuopuoati	Количество частиц, м <sup>3</sup>								
газмерность	Опыт	Ср. значение*	$\Delta$						
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						

### Запыленность среды за циклоном (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)

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<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) содержат основное количество частиц размером 6,1 мкм (MgO) и 10,5 мкм (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), 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.

Исследование проводились на микроскопе Nikon MM-40 с камерой Olympus DP-70 (рис. 6). Частицы вещества насыпали на чашку Петри, которую затем помещали под микроскоп (рис. 7).

Перемещая платформу микроскопа с помощью подвижек (1, 2), выбирались частицы вещества из видимой области программы «Olympus» (3), которые необходимо было измерить. Размер величины, на которую перемещалась платформа, определялась с помощью прибора Nikon SC-212(4). Изображение с микроскопа выводилось на экран монитора с помощью программы «Olympus». На рис. 8, 9 изображены частицы вещества Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> до и после циклона под микроскопом с увеличением 20х. Результаты состава проб по размерам частиц приведены в табл. 9.



Рис. 6. Внешний вид микроскопа Nikon с камерой Olympus: 1, 2 – подвижки; 3 – окно программы «Olympus»; 4 – Nikon SC-212



Рис. 7. Чашка Петри



Рис. 8. До циклона Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>



Рис. 9. После циклона Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

Таблица 9

Результаты определения состава проб вещества Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		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. 10, 11 изображены частицы вещества MgO до и после циклона под микроскопом с увеличением 20х. Результаты состава проб по размерам приведены в табл. 10.



Рис. 10. До циклона МдО



Рис. 11. После циклона МдО

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:

• Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 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 м<sup>3</sup>/ч:

• 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 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (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 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> через циклон в основном наблюдается проскок частиц размером 0.3...1.0 мкм (~  $5 \cdot 10^8$  част/м<sup>3</sup>).

4. Проведены исследования фракционного состава порошков MgO и  $Fe_2O_3$  в исходном состоянии и после улавливания в бункере. Показано, что исследуемый циклон позволяет улавливать частицы MgO и  $Fe_2O_3$  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 м<sup>3</sup>/ч.

#### 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.: Стандартинформ, 2008. С. 50.