

Технология и технологические машины



ОТКИДАЧ
Леонид Георгиевич
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)

OTKIDACH
Leonid Georgievich
(Moscow, Russian Federation,
Bauman Moscow State
Technical University)

УДК 621.8:504.6

Устройство защиты от вредных выделений (шума, светового излучения и аэрозолей) в пределах допустимых концентраций для оснащения полуавтоматов и машин термической резки металлов с программным управлением

Л.Г. Откидач

В машиностроительных отраслях производства на заготовительных операциях применяется высокопроизводительный (20...0,2 м/мин) способ плазменной разделительной резки металлов в диапазоне толщин 1...100 мм с точностью позиционирования инструмента (плазмотрона) 0,25 мм. Особое значение приобретает применение указанного технологического процесса при резке коррозионно-стойких металлов с высоким содержанием легирующих элементов, титановых сплавов и цветных металлов. В настоящее время альтернативной технологии с сопоставимыми технико-экономическими показателями (гидроабразивная, лазерная, кислородно-флюсовая, сверхзвуковая терморреактивная и другие способы обработки) в металлообрабатывающей промышленности не существует. Все процессы разделительной резки сопровождаются целым рядом вредных выделений.

В статье рассмотрены наиболее острые экологические проблемы процесса плазменной обработки: шумовой фон, световое излучение, выделение аэрозолей и выброс расплава, отрицательно влияющие на творческую деятельность, производительность труда и, в целом, на жизнедеятельность, как непосредственно на операторов установки, так и на персонал смежных участков производственного помещения. Предложена конструкция защитного устройства от вредных выделений, предназначенного для установки

на машинах и полуавтоматах термической резки. Представлена модель газогидродинамического тракта плазматрон-металл, являющегося источником перечисленных вредных выделений, на основании схемного решения которой была спроектирована и изготовлена конструкция защитного независимого устройства с возможностью установки на машинах и полуавтоматах термической резки, находящихся в эксплуатации и вновь проектируемых. Приведены результаты эксплуатации устройства по снижению вредных выделений в сравнении с предельно допустимыми концентрациями, установленными санитарными нормами.

Указанное устройство может быть рекомендовано к применению, в частности, в процессе гидроабразивной резки-гравировки, где уровень звукового давления и газопылевывделений значительно выше, чем при плазменной обработке. При этом не потребуются внесение изменений в конструкцию основной машины.

Ключевые слова: защитное устройство, машины термической резки, плазматрон, газогидродинамический тракт, световое излучение, аэрозоли, расплав.

Equipment for protecting against harmful emissions (noise, light radiation, and aerosols) within allowable concentrations for program-controlled semi-automatic machines for thermal cutting of metals

L.G. Otkidach

Engineering industries apply high-performance (0.2 ... 20 m/min) plasma arc cutting of metals within the thickness range from 1 to 100 mm with a positioning accuracy of the instrument (plasma torch) of 0.25 mm for blanking operations. This procedure is most suitable for cutting corrosion-resistant metals with a heavy percentage of alloying elements, as well as tita-

niun alloys, and non-ferrous metals. Currently, there is no alternative technology with comparable technical and economic parameters to water-jet, laser, oxygen-fluxing, supersonic thermosetting, and other processing techniques in the metal-working industry. All cutting processes are accompanied by a variety of harmful emissions. The paper deals with the most pressing environmental problems of plasma treatment such as background noise, light emission, release of aerosols, and melt ejection, which adversely affect creative activity, labor productivity, and, in general, vital activity of plant operators and other personnel in the working area. A design of the device protecting from harmful emissions that will be installed on semi-automatic thermal cutting machines is proposed. A model of the gas-hydrodynamic plasma torch-metal path as a source of harmful emissions is developed. The circuit analysis of this model made it possible to design and fabricate an independent protective device to be mounted on semi-automatic thermal cutting machines both in service and newly designed. The implementation of the device resulted in reducing harmful emissions compared to maximum allowable concentrations established by sanitary regulations. This device can be recommended for application in water-jet etching, where the level of sound pressure and gas and dust emissions is significantly higher than in plasma processing. In this case, the main machine does not require any modifications.

Keywords: protective device, thermal cutting machines, plasma torch, gas-hydrodynamic path, light emission, aerosols, liquid melt.

Процессы плазменной обработки электропроводящих материалов сопровождаются генерированием пылегазовывделений, световых и шумовых эффектов и, в известной мере, выбросом расплава в нерасчетных режимах. Влияние первых двух факторов на обслуживающий персонал достаточно полно рассмотрено в литературе. Менее изучено влияние шума, хотя по характеру его воздействия на организм человека, он также значим. Анализ результатов медико-биологических исследований, проводимых в нашей стране и за рубежом, показал, что наиболее неблагоприятное воздействие на человека оказывают колебания частот в диапазоне 1...20 000 Гц. Вопреки ши-

роко распространенному представлению, шум оказывает вредное воздействие не только на органы слуха, но и через центральную нервную систему на весь организм человека. Поэтому применение антифонов является явно недостаточной защитой. Мягкие органы человека, на 2/3 состоящие из воды, реагируют на низкие частоты (1...20 Гц), костная ткань реагирует на высокие частоты, в том числе, за порогом слышимости человека. Основные частоты собственных колебаний отдельных частей тела человека представлены ниже:

Положение тела:	Частота, Гц
лежа	3–4
сидя	4–6
стоя	5–12
Часть тела:	
глазное яблоко	60–90
голова	20–30
согнутые руки	30–60
грудная клетка	5–8
брюшная полость	3–4

На основании всестороннего анализа технологического процесса плазменной резки металла установлены основные области и непосредственно связанные с ними источники шумообразования (рис. 1): внутренняя полость плазмотрона (I), которую можно представить в виде резонатора Гельмгольца; газовая (плазменная) струя на открытом участке между срезом плазмотрона и верхней кромкой металла (II); зона соударения плазменной струи с ванной расплавленного металла (III); зона акустического возбуждения волновода-полости реза (IV); зона потока отработанных газов и расплава на выходе из полости реза (V), а также зона вентиляционных систем и внутренней полости раскройного стола.

Аэродинамическая природа происхождения рассматриваемого процесса несомненна, так как механические колебания (вибрация) газорезущей машины и других механических систем пространственного перемещения инструмента не сопоставимы по величине с аэродинамическим шумом, звуковое давление которого может достигать 120...130 дБА. Это позволяет использовать положения аэро- и газодинамики для разработки методов борьбы с шумами при

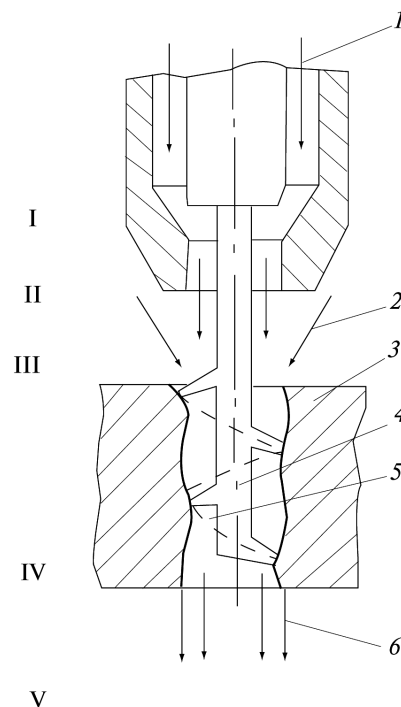


Рис. 1. Модель источника шумообразования процесса плазменной резки:

- 1 — плазмообразующий газ (воздух);
- 2 — инжектируемый газ (воздух);
- 3 — обрабатываемый металл; 4 — дуговой разряд;
- 5 — траектория шунтирующих перемычек дугового разряда; 6 — эвакуация расплава из полости реза

плазменной резке. Согласно приведенному выше перечню, наиболее вероятные источники шумообразования располагаются на различных уровнях плазменной струи. Зона I определяется внутренним объемом плазмотрона (катодно-сопловой областью). У большинства плазмотронов механизированной резки объем форкамеры $V = 5...10 \text{ см}^3$ и согласно зависимости Гельмгольца она является источником колебаний окружающей воздушной среды с частотой 80...100 Гц:

$$f_p = \sqrt{\frac{S}{LV}},$$

где f_p — резонансная звуковая частота плазмотрона, Гц; S — площадь соплового отверстия, мм^2 ; L — эффективная длина сопла, м; V — объем форкамеры плазмотрона, м^3 .

Зона II — участок струи (с параметрами истечения v_2 ; T_2) в промежутке между нижним срезом сопла и верхней кромкой разрезаемого металла. Вследствие интенсивного расширения, а также подсоса воздуха из окружающей

среды в этой зоне происходит турбулизация потока со значительными изменениями температуры и скорости истечения.

Зона III — участок, в котором струя газа, концентрично окружающая дуговой разряд с параметрами (v_3 ; T_3), входит в контакт с ванной расплавленного металла. В результате этого возникают ударные шумы, замаскированные в общем спектре широкополосного шума.

Зона IV — участок, на котором полость разрезаемого металла образует волновод с собственной частотой излучения

$$v = c / (4l), \quad (1)$$

где c — скорость звука в воздушной среде, м/с; l — длина волновода или толщина разрезаемого металла, м.

Частота звука, определяемая по приведенной зависимости (1) для обрабатываемого листа металла толщиной 5...30 мм и частотой излучения $1/4$ длины волны, составляет 1 296...240 Гц и хорошо согласуется с экспериментальными значениями частоты на выходе из полости реза. В каждый отдельный момент времени полость реза увеличивается на величину δ , зависящую от перманентной эвакуации расплава, поэтому спектр шума в определенных пределах изменяется практически непрерывно в зависимости от гидродинамической природы образования полости.

В зоне V на выходе струи из полости реза происходит дополнительная турбулизация плазменного потока вследствие очередного ее перемешивания с эжектируемым в полость реза воздухом и соударения с расплавом. При этом струя становится источником низкочастотного аэродинамического шума. Исходя из положения о том, что одна из причин возникновения газодинамических шумов заключается в образовании спиральных вихрей в среде, прилегающей к газовому потоку, была предпринята попытка уменьшить акустическую эффективность струи за счет снижения ее турбулентности и спроектировать конструкцию шумопоглощающего сопла с эжектированием поперечного воздушного потока, сглаживающего спиральные вихри. Для этого был изготовлен и исследован ряд конструктивно различных сопел (рис. 2) с естественной эжекцией (пассив-

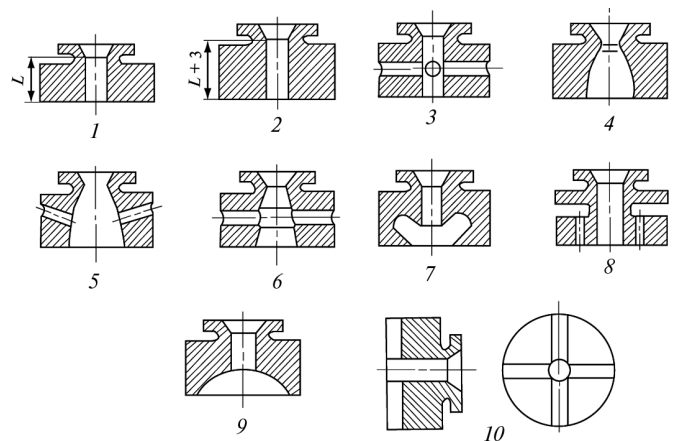


Рис. 2. Конструкции исследуемых сопел

ных) и с принудительной подачей воздуха (активных).

Замеры общего уровня шума и определение его спектрального состава проводили спектрометром типа 2112 фирмы «Брюль и Кьер» (Дания). При выполнении замеров микрофон устанавливался на расстоянии 1 м от плазматрона (ближайшей зоне расположения оператора машины) в горизонтальной плоскости, совпадающей с верхней плоскостью обрабатываемого листа, т. е. в направлении максимального распространения звуковой волны, исходящей из зазора сопло-металл. Первоначально сопла испытывали на незажженном резачке при истечении «холодных» струй в предварительно подготовленную, имитирующую полость реза металла толщиной 100 мм. Давление невозмущенного потока составляло 0,15 МПа. При этом уровень шума при применении серийных сопел с цилиндрическим каналом достигал 94 дБА; некоторых специальных сопел — уровня санитарных норм практически во всем диапазоне частот 63...31 500 Гц.

Анализ известной в акустике формулы Лайтхилла

$$P = K \rho A v^8 / c_0^5,$$

(P — звуковая мощность, Вт; K — безразмерная постоянная, определяемая экспериментально; ρ — плотность окружающей среды, кг/м³; A — поперечное сечение струи, м; v — скорость истечения струи, м/с; c_0 — скорость звука в окружающей среде, связывающей параметры газо-

вого потока со звуковой мощностью, м/с) показывает, что варьировать указанными параметрами в сторону их уменьшения, за исключением скорости звука — величины постоянной в данных условиях, с целью снижения звукового давления практически невозможно, так как одновременно падает проникающая способность плазменной струи. Уменьшение поперечного сечения струи возможно, в частности, за счет ужесточения условий стабилизации дуги или сужения диаметра канала формирующего сопла, однако это отрицательно влияет на надежность работы плазмотрона и качество резки из-за прогрессирующей эрозии последнего.

В таблице 1 представлены результаты исследования пассивных сопел при плазменной обработке металлов, не подверженных кислородной резке (коррозионно-стойкая сталь, цветные металлы). Данные об активных соплах не приводятся, так как эффект от снижения шума получен несущественный, а вследствие значительных габаритов, эти сопла неудобны в эксплуатации.

Анализ испытаний сопел показал, что ни одна из представленных конструкций не позволяет получить шумогасящий эффект, необходимый для обеспечения санитарных норм (СН) по общему уровню шума. Санитарных норм удается достичь только в октавных полосах акустического спектра для низких (250...500 Гц) и ультразвуковых (31 500 Гц) частот. Общий же уровень шума при зажигании дуги (точнее установившегося дугового разряда) возрастает в среднем на 15...20 дБА и составляет от 111...122 дБА, т. е. далеко за пределами СН. Некоторое снижение на 3...7 дБА достигается в случае применения цилиндрического сопла с радиальными сквозными отверстиями и сопла типа «Лавалья» с внутренней кольцевой проточкой и радиальными отверстиями эжекторного типа. Важно также отметить влияние марки металла на характер частотной характеристики процесса плазменной обработки. Так, при резке латуни и дуралюминия максимум звукового давления наблюдается на частоте 4 000 Гц, при резке коррозионно-стойкой

Таблица 1

Результаты испытаний сопел (режим разделительной резки)

Позиция на рис. 2	Металл	Общий уровень шума, дБА	Уровень шума в октавных и третьоктавных полосах при частоте (Гц), дБА							
			250	500	1 000	2 000	4 000	6 000	16 000	31 500
1	Сталь Х18Н10Т	114	85,5	91,5	98	103	106	107,5	109,5	114
3		111	—	97,5	102	104,5	104,5	106	105,5	111
4		113	—	97	102	103,5	106	110,5	112	102
1	Латунь ЛС59	120	82	84,5	100	100	114	113	109	96
3		117	80,5	82,5	97	111	113	109	103	95
4		117	—	85	97	112	115,6	109	104	100
8		120	77	84	98	112	115	110	107	96
9		119	79	85,5	98	111	116	111,5	104	97
10		117	79,5	86	97	111	115	109	103	101
1	Дуралюминий Д16	122	90	97	105	113	119	110	109	110
2		119	89	90	102	108	114	108	105	104
3		120	90	102	102	108	112	108	105	105
5		115	—	—	—	107	111	106	100	100
6		117	—	100	100	102	109	105	100	103
7		120	89	100	101	107	114	106	106	105
Нормы по ГОСТ 12 1003—76										
		85	86	83	80	78	76	74	85	110

стали нарастание шума от частоты происходит без экстремальных значений. Таким образом, для снижения вредных выделений, присущих данному процессу, необходимы методы активного внешнего вмешательства. Однако при этом следует учитывать, что скорость истечения и температура электропроводящей плазменной струи почти на порядок отличаются от подобных показателей газовых потоков, являющихся продуктом химических реакций, и тем более «холодных» струй. Поэтому использование шумопоглощающих многоканальных, лабиринтных и иных систем из традиционных материалов для плазменной обработки неприемлемо.

Каким образом с конструктивной точки зрения решаются затрагиваемые экологические вопросы за рубежом и в отечественной практике? Фирмы ESAB, Messer Griesheim, Linde и др., являющиеся крупнейшими производителями оборудования для термической резки, выпускают стационарные комбинированные машины (плазменно-кислородные) для обработки листового металла под слоем воды на глубине 60...80 мм. При этом шум и световое излучение снижаются на 90%, выделение аэрозоля в атмосферу — на 80...90%. Вместе с тем возникают новые проблемы, связанные с утилизацией воды, снижением производительности на 20...50%, качества резки (скос кромок, увеличение грата) и уменьшении на 50% срока службы катода плазматрона. Предельная толщина обрабатываемого металла при резке под слоем воды составляет 30 мм. Кроме того машина должна быть оборудована холодильной установкой для поддержания температуры воды ванны раскройного стола в заданных пределах, что удорожает стоимость машины в 1,5 раза.

Отечественные установки термической резки не оборудованы устройствами защиты от вредных выделений. Устанавливаемые, например, на машинах «Кристалл» защитные кожухи предохраняют оператора и обслуживающий персонал только от прямого светового излучения.

В основу представляемого устройства заложен эффективный способ комплексной экологической защиты, включающий известное ра-

нее решение резки «на воду», согласно которому лист разрезаемого металла устанавливается с небольшим зазором (3...8 мм) относительно зеркала воды раскройного стола. Таким образом решается задача поглощения ~ 30% вредных выделений со стороны нижней кромки листа. Большая же их часть ~ 70% между срезом сопла плазматрона и верхней кромкой металла локализуется специально разработанным защитным устройством, устанавливаемым на суппорте стационарной или переносной машины «Комета», «Кристалл», «Енисей», «ШПл-1м», «Микрон» и др. (рис. 3).

Устройство имеет независимую от суппорта подвеску, благодаря которой обеспечивается свободный доступ к быстроизнашивающимся узлам резака (катод, сопло), а также выставляется необходимый зазор между плазматроном и металлом. Образующиеся в процессе резки газо-пылевыведения и выбросы расплавленного металла локализуются в объеме защитного устройства без каких-либо повреждений и деформаций последнего и поступают в ванну рас-

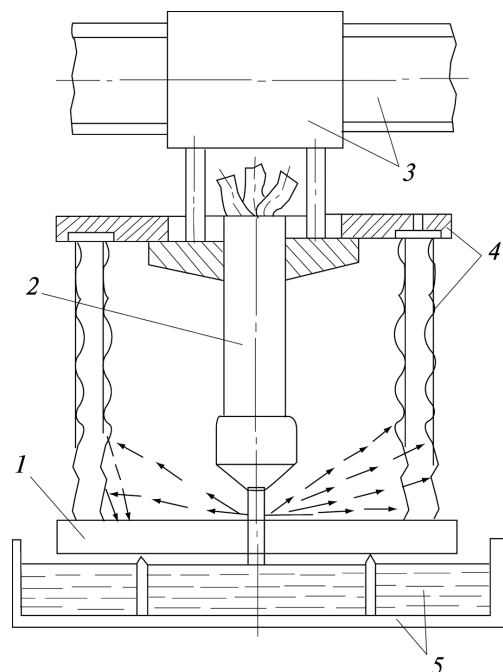


Рис. 3. Принципиальная схема защитного устройства:

- 1 — обрабатываемая заготовка (лист металла);
- 2 — плазматрон; 3 — портал с суппортом машины термической резки; 4 — защитное устройство;
- 5 — раскройный стол с ванной

кройного стола, где ббольшая их часть (85...95%) растворяется и оседает на дно ванны. Одновременно достигается высокая степень шумопог-

лощения ~ 20 дБА и 100%-ная светозащищенность обслуживающего персонала. В отсутствие защиты световое излучение может дости-

Таблица 2

Значения звукового давления, дБ, при плазменной резке малоуглеродистой и коррозионно-стойкой сталей до и после установки защитного устройства (замеры проведены в зоне рабочего места оператора машины, начиная от 0,2 м)

Условие проведения эксперимента	Звуковое давление, дБ, в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц									Суммарное значение шума, дБА
	31	63	125	250	500	1 000	2 000	4 000	8 000	
Истечение «холодной» струи газа без защитного устройства	52	50	48	49	59	67	69	73	75	84
Вентиляция общеобменная	—	—	—	—	—	—	—	—	—	85
Фон предприятия	82	83	84	82	81	78	73	65	64	82
<i>Сталь Ст.3, ток 340 А, напряжение 180 В, толщина металла 20 мм, площадь помещения 300 м²</i>										
Резка без защитного устройства	96	85	90	85	88	96	102	108	110	115
Резка с защитным устройством	60	75	86	92	90	96	76	78	80	94
<i>Сталь 45Г17Ю3, ток 300 А, напряжение 185 В, толщина металла 20 мм, помещение—заводской цех</i>										
Резка без защитного устройства	83	83	84	83	81	86	84	87	92	103
Резка с защитным устройством	84	82	85	90	86	83	84	81	83	86
Санитарные нормы СН 1009—73	110	99	92	86	83	80	78	76	74	85
Санитарные нормы СН 3223—85	107	95	87	82	78	75	73	72	69	80

Таблица 3

Содержание вредных веществ, мг/м³, в зоне рабочего места оператора машины и в воздушном бассейне заготовительного цеха при плазменной резке наиболее характерных металлов до и после установки защитного устройства

Наименование вещества	ПДК, мг/м ³	Легированные конструкционные стали	Коррозионно-стойкие стали	Высокомарганцевые стали	Сплавы алюминия
Пыль	4	21/1*	119/3	4/2	87/17
Хромовый ангидрид	0,01	011/0,002	0,3/0,014	0,01/0,008	0/0,003
Марганец	0,2	0,03/0,15	0,1/0,003	0,16/0,04	0,27/0,27
Никель	0,05	0,15/0,01	0,57/0,01	0,03/0,025	—
Алюминий	2,0	—	—	—	0,3/0,26
Озон	0,1	0,4/0,66	0,68/0,51	0,53/0,1	—
Оксид углерода	20	0,0	0,0	0,0	0,0
Оксид азота	2,0	10/8	10/9	12/10	19/52

*Без применения защитного устройства/ с применением.

гать 1 200 лк в зависимости от толщины обрабатываемого металла, т. е. потребной мощности. Преимуществами предлагаемого устройства являются автономность, т. е. возможность установки на уже действующие и вновь разрабатываемые машины различного уровня, отсутствие отрицательного влияния на технологические параметры резки (скорость, качество кромки и др.), применение серийной плазменной аппаратуры (источников питания, плазмотронов), предназначенных для работы в воздушной среде и исключение дополнительной (цеховой) вентиляции в целях сохранения теплового воздушного баланса в производственном помещении. Результаты испытаний, проведенных санитарно-эпидемиологической станцией одного из заводов, по результатам которых данная технология и конструкция были внедрены, приведены в табл. 2, 3. Общий вид машины плазменной резки с установленным защитным устройством в работе представлен на рис. 4.



Рис. 4. Портальная машина «Енисей» (ППЛц-2.5) с числовым программным управлением, плазменной оснасткой и защитным устройством

Выводы

1. Процесс плазменной резки при отработанных технологических режимах (устойчиво работающих плазмотронах, качественных параметрах полости реза и др.) является источником повышенного уровня вредных выделений: шума, светового излучения и аэрозолей, величины которых превышают допустимые санитарные нормы СН 3223—85 воздействия на организм чело-

века; к наиболее трудноустраняемым из них относится шумовой эффект.

2. По результатам экспериментальных исследований представлена модель плазменной струи в системе плазмотрон-металл, позволяющая разбить трассу потока концентричной газо-разрядной дуги на последовательные зоны (I—V) — участки интенсивной генерации звука и, соответственно, определить возможные варианты защиты на основе газодинамических факторов или экранирующих устройств.

3. Установлено, что в сравнении с имеющими место механическими колебаниями (вибрацией) исполнительных механизмов перемещения плазмотрона и шумовым фоном производственного помещения, составляющим порядка 90 дБ, аэродинамический шум, генерируемый плазменной струей, является преобладающим, так как достигает значений 130...90 дБ на рабочем месте оператора, отстоящем от зоны резки на 1...10 м, в зависимости от размеров раскройного стола.

4. Определено, что изменением отдельных газодинамических параметров истекающих газовых потоков, в частности, внесением новых решений в конструкцию формирующего соплового аппарата плазмотрона, можно уменьшить уровень звукового давления в некоторых областях частотного диапазона на 3...15 дБ. Общий же уровень звукового давления превышает допустимые СН и при этом резко снижаются количественные и качественные показатели процесса.

5. Экспериментально доказана эффективность применения защитного устройства по снижению вредных выделений до уровня ПДК в процессе плазменной резки металлов.

Литература

- [1] Мунин А.Г., Квитко Е.Е., ред. *Авиационная акустика*. Москва, Машиностроение, 1973. 448 с.
- [2] Сидельников Т.Х. *Автоколебательное шумообразование при истечении газовых струй*. Москва, Наука, 1971. 230 с.
- [3] Краснов Н.Ф., ред. *Основы прикладной аэрогазодинамики. В 2 кн. Кн. 2: Обтекание тел вязкой жидкостью*. Москва, Высшая школа, 1991. 358 с.
- [4] Ключев В.В., ред. *Справочник по контролю промышленных шумов*. Москва, Машиностроение, 1976. 447 с.
- [5] Youjun Zhn. Analysis of Flow Field and Noise Radiated from Axial Fan. *International Congress on Acoustics*. 2008. 837 p.
- [6] Sum K.S., Pan J. Effects of the inclination of a rigid wall on the free vibration characteristics of acoustic modes in a

trapezoidal cavity. *Journal of the Acoustical Society of America*, 2006, vol. 119, issue 4, pp. 2201–2210.

[7] Schmidt W. Delphinluftschiff mit Wellantrieb — Wirkung elastischer Wellerblätter. *Technisch-ökonomische Informationen der zivilen Luftfahrt*, 1974, vol. 10, no. 4, pp. 240–242.

[8] Kanev N. Sound decay in a rectangular room with specular and diffuse reflecting surfaces. *Proceedings of Forum Acusticum*, 2011, Aalborg, Denmark, pp. 1935–1940.

[9] Юдин Е. Я., ред. *Борьба с шумом на производстве. Справочник*. Москва, Машиностроение, 1985. 399 с.

[10] Исаченко А.А., Откидач Л.Г., Никифоров Н.И. Влияние геометрии сопла на уровень шума при плазменной резке. *Тр. ВНИИАвтогенмаш*. Москва, 1980, вып. XXV, с. 52–59.

[11] Ильницкая А.В., Откидач Л.Г. Акустические характеристики плазменно-дуговой резки металлов и вопросы борьбы с шумом. *Тр. ВНИИАвтогенмаш*, вып. XXV. Москва, 1980, с. 60–68.

[12] Откидач Л.Г. Шумопоглощающие устройства в процессах механизированной плазменной резки. *Сварочное производство*, 1993, № 3, с. 23–25.

References

[1] *Aviatsionnaya akustika* [Aviation acoustics]. Ed. Munin A.G., Kvitko E.E. Moscow, Mashinostroenie publ., 1973. 448 p.

[2] Sidel'nikov T.Kh. *Avtokolebatel'noe shumobrazovanie pri istechenii gazovykh strui* [Self-oscillatory noise level at the end of the gas jets]. Moscow, Nauka publ., 1971. 230 p.

[3] *Osnovy prikladnoi aerogazodinamiki. Kn. 2. Obtekanie tel viazkoi zhidkost'iu* [Fundamentals of Applied aerogas dynamics. Book 2. Viscous fluid flow over bodies]. Ed. Krasnov N.F. Moscow, Vysshaya shkola publ., 1991. 358 p.

[4] *Spravochnik po kontroliu promyshlennykh шумов* [Handbook of industrial noise control]. Ed. Kliuchev V.V., Moscow, Mashinostroenie publ., 1976. 447 p.

[5] Youjun Zhn. Analysis of Flow Field and Noise Radiated from Axial Fan. *International Congress on Acoustics*. 2008. 837 p.

[6] Sum K.S., Pan J. Effects of the inclination of a rigid wall on the free vibration characteristics of acoustic modes in a trapezoidal cavity. *Journal of the Acoustical Society of America*, 2006, vol. 119, issue 4, pp. 2201–2210.

[7] Schmidt W. Delphinluftschiff mit Wellantrieb — Wirkung elastischer Wellerblätter. *Technisch-ökonomische Informationen der zivilen Luftfahrt*, 1974, vol. 10, no. 4, pp. 240–242.

[8] Kanev N. Sound decay in a rectangular room with specular and diffuse reflecting surfaces. *Proceedings of Forum Acusticum*, 2011, Aalborg, Denmark, pp. 1935–1940.

[9] *Bor'ba s шумом na proizvodstve*. Spravochnik [Control of noise at work. Directory]. Ed. Iudin E. Ia. Moscow, Mashinostroenie publ., 1985. 399 p.

[10] Isachenko A.A., Otkidach L.G., Nikiforov N.I. *Vliianie geometrii sopla na uroven' shuma pri plazmennoi rezke* [Effect of nozzle geometry on the noise level in plasma cutting]. *Trudy VNIIAvtoгенmash* [Proceedings VNIIAvtoгенmash]. Moscow, issue 25, 1980, pp. 52–59.

[11] Il'nitskaia A.V., Otkidach L.G. *Akusticheskie kharakteristiki plazmenno-dugovoi rezki metallov i voprosy bor'by s шумом* [Acoustic characteristics of plasma arc metal cutting issues and noise control]. *Trudy VNIIAvtoгенmash* [Proceedings VNIIAvtoгенmash]. Moscow, issue 25, 1980, pp. 60–68.

[12] Otkidach L.G. *Shumopogloshchayushchie ustroystva v protsessakh mekhanizirovannoi plazmennoi rezki* [Sound-absorbing devices in the process of mechanized plasma cutting]. *Svarochnoe Proizvodstvo* [Welding International]. 1993, no. 3, pp. 23–25.

Статья поступила в редакцию 08.06.2013

Информация об авторе

ОТКИДАЧ Леонид Георгиевич (Москва) — кандидат технических наук, доцент кафедры «Основы конструирования машин». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: lgotk@mail.ru).

Information about the author

OTKIDACH Leonid Georgievich (Moscow) — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor of «Fundamentals of Machine Design» Department. Bauman Moscow State Technical University (BMSTU, building 1, 2-nd Baumanskaya str., 5, 105005, Moscow, Russian Federation, e-mail: lgotk@mail.ru).