

DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-2-38-48

¹Шашин А.В., ^{1,*}Шепс Р.А., ²Семенов А.С., ²Минко В.А.¹Воронежский государственный технический университет²Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

*E-mail: romansheps@yandex.ru

МЕСТНАЯ ВЫТЯЖНАЯ ВЕНТИЛЯЦИЯ С ЭЖЕКТИРОВАНИЕМ ВЗРЫВООПАСНЫХ ВЕЩЕСТВ И РЕЦИРКУЛЯЦИЕЙ ОЧИЩЕННОГО ВОЗДУХА

Аннотация. Системы вытяжной вентиляции на промышленных предприятиях и объектах с применением вредных веществ в значительной мере определяют воздухообмен на рабочих местах для обеспечения нормируемых санитарно-гигиенических условий и эксплуатационных затрат. Особую значимость эффективного воздухообмена в таких помещениях представляет местная вытяжная вентиляция взрывоопасных вредных веществ, поскольку к их локализации, отсосу и транспортированию предъявляются повышенные требования. В работе представлены результаты аналитических и экспериментальных исследований режима работы комплексного местного вытяжного устройства с газовым эжектором для отсоса из укрытий взрывоопасных вредных химических веществ, обеспечивающего их эффективную локализацию, очистку и рециркуляцию воздуха. Приведены граничные условия и допущения расчета характеристик процессов эжекции газовых потоков, очистки технологических выбросов и рециркуляции очищенного газового потока, определенные на основе анализа ранее выполненных исследований и экспериментальных работ. Определены условия рациональных соотношений параметров устройства отсоса источников вредных выделений веществ, параметров эжектора и устройства очистки выбросов, при которых достигается экономическая и экологическая эффективность применения установки и исключается взрывоопасная ситуация на химически опасных предприятиях и объектах.

Ключевые слова: местная вытяжная вентиляция, взрывоопасные вещества, эжектор, рециркуляция, энергоэффективность систем вентиляции, расчет эжекции.

Введение. Системы вытяжной вентиляции на промышленных предприятиях и объектах с применением вредных веществ в значительной мере определяют воздухообмен на рабочих местах для обеспечения нормируемых санитарно-гигиенических условий и эксплуатационных затрат [1–5]. Особую значимость эффективного воздухообмена в таких помещениях представляет местная вытяжная вентиляция взрывоопасных вредных веществ, поскольку к их локализации, отсосу и транспортированию предъявляются повышенные требования [6–9]. В выбрасываемом вентиляционном выбросе в атмосферу их содержание не должно превышать 30 % нижнего концентрационного предела взрываемости (НКПВ) [6], а на рабочих местах в производственном помещении – не более 10 % [1].

Главными факторами, определяющими расход местного вытяжного и приточного воздуха, являются конструктивная схема отсоса взрывоопасных вредных веществ (ВВВ) из технологического источника и средства их удаления, при которых сочетания неблагоприятных воздействий производственных и случайных факторов не приведут к возникновению взрывоопасной ситуации, подтверждение которых желательно с использованием CFD моделирования [10–11].

Для предотвращения взрыва транспортируемой газовой смеси применяются вентиляторы во

взрывобезопасном исполнении для многократного разбавления ВВВ у места их образования с подсосом воздуха из помещения. Однако газовые эжекторы являются наиболее надежными, поскольку не имеют вращающихся элементов в газовом тракте и способны обеспечить производительность отсоса, во много раз превышающую производительность используемого вентилятора для выработки активного газа. Ограниченное их применение обусловлено преимущественно сравнительно меньшим, в 1,5–2 раза, коэффициентом полезного действия по сравнению с вентилятором. Повысить к.п.д. газового эжектора возможно за счет применения вместо вентилятора компрессора с давлением до 1 МПа, однако в реальных условиях это не всегда осуществимо. Находят применение вихревые вакуумные насосы, работа которых основана на принципе работы трубки Ранка [12], однако для их работы также требуется давление воздуха более 0,2 МПа.

Кроме этого, средства локализации и удаления ВВВ должны обеспечить безопасность при отсосе паров веществ, способных конденсироваться в холодный период года в воздуховодах или в выбросной шахте, а также при вентилировании канализационных и газовых систем. Наиболее эффективными являются закрытые и полужакрытые местные отсосы, обладающие ря-

дом преимуществ по сравнению с другими видами, среди которых наиболее значимыми являются:

- значительная локализация выделяемых паров вредных веществ (ВВ);
- обеспечивается строго направленное перемещение объема ВВ;
- достигаются наименьшие удельные энергетические затраты на удаление ВВ;
- снижается расход приточного воздуха, поскольку подобные укрытия позволяют с высокой эффективностью улавливать выбросы ВВ из источника.

Несмотря на протекание подавляющего числа технологических процессов вне области воспламенения ВВ, возможна вероятность возникновения условий для образования взрывоопасных концентраций и поэтому при обращении с ними требуются высоконадежные системы удаления и обезвреживания технологических выбросов [6].

Для обеспечения безопасного удаления ВВ используются газовые эжекторы, обладающие способностью в несколько раз увеличивать расход отсасываемой газозвушной смеси с укрытий выделения ВВ относительно производительности вентилятора, позволяющие достичь значительных разрежений. Ранее выполненные

исследования [1–3] и практическая их реализация применения газовых эжекторов были направлены на достижение на выходе из эжектора концентрации ВВ в воздухе ниже нижнего концентрационного предела их взрываемости с воздухом.

Целью данной работы является определение состава и режима работы эжекторно-очистной установки с рециркуляцией очищенных вентиляционных выбросов, обеспечивающей снижение энергетических затрат на эксплуатацию местной вытяжной и приточной вентиляции при повышенной безопасности отвода ВВВ.

Методы исследования. Для достижения снижения удельного энергопотребления при работе местной вытяжной и общеобменной вентиляции в производственном помещении были выполнены теоретические исследования и схемные решения по обеспечению снижения выделения из источника ВВВ, эффективного и безопасного отсоса ВВВ, обезвреживанию химически опасных выбросов и рециркуляции очищенных выбросов для снижения отсоса воздуха из помещения.

Принципиальная схема такой комплексной установки и характер изменения параметров газозвушной смеси на различных участках газового тракта установки представлена на рис. 1.

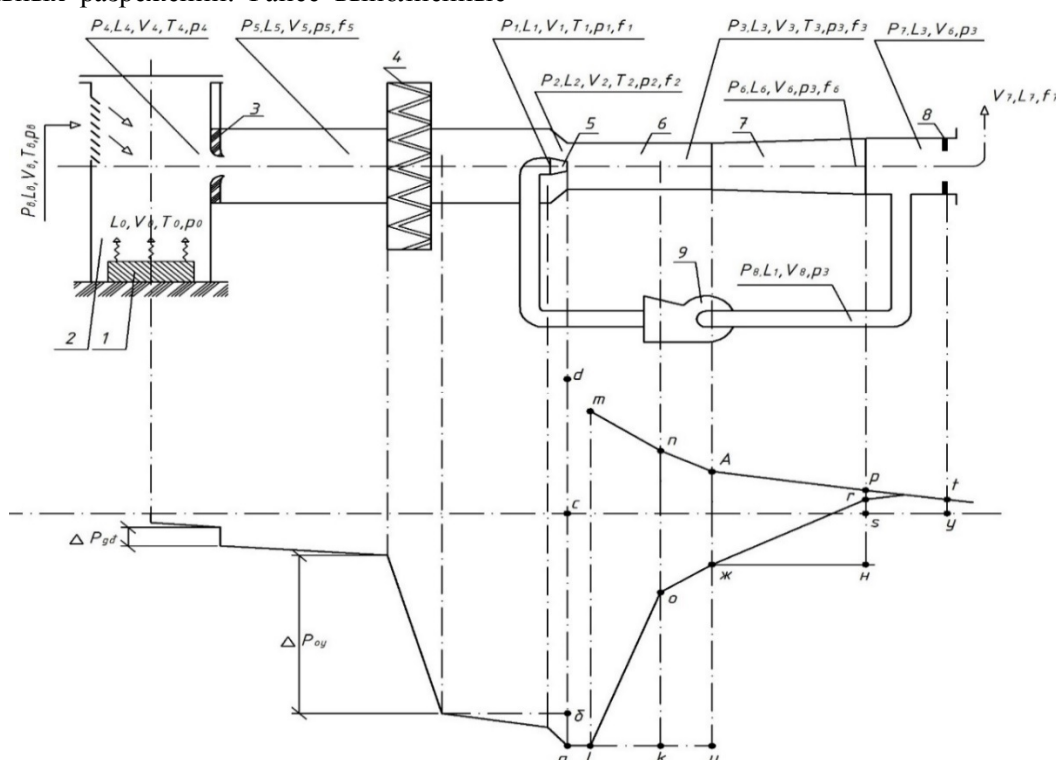


Рис. 1. Эжекторно-очистная установка локализации взрывоопасных выделений вредных веществ, их обезвреживания и рециркуляции очищенных выбросов

- 1 – источник выделения взрывоопасных веществ, 2 – укрытие, 3,8 – дросселирующие устройства, 4 – очистное устройство, 5 – сопловой насадок активного газа, 6 – смешительная камера, 7 – диффузор, 9 – вентилятор

Приняты следующие обозначения параметров: P – давление, L – расход, V – скорость, T –

температура, ρ – плотность вентиляционного воздуха, f – площадь сечения; нижние индексы: в –

параметры воздуха, поступающего в укрытие, 0 – параметры конвективного потока в укрытии источника ВВВ, 1 – параметры на выходе из насадка эжектора, 2 – перед смесительной камерой эжектора, 3 – на выходе из камеры эжектора, 4 – на выходе из диффузора, 5 – на выходе из укрытия (перед очистным устройством), 7 – смесь, поступающая в окружающую среду, 8 – очищенная смесь, поступающая в вентилятор, следует отметить, что V_3 – скорость после завершения смешения, V'_3 скорость смешиваемых потоков в начале смесительной камеры, при этом $V'_3 > V_3$.

На рис.1 введены следующие обозначения эпюры давления газовых потоков:

ΔP_{op} – гидравлическое сопротивление дросселирующего устройства; ΔP_{oy} – гидравлическое сопротивление очистного устройства; $c - d$ – полное давление, развиваемое вентилятором; $(l - m)$ – динамическое давление активного и отсасываемого газов на участке их смешивания, равное $\rho_3 \cdot (V'_3)^2 / 2$; $(a - b)$ – динамическое давление поступающего отсасываемого газа в смесительную камеру и создающее дополнительное разрежение на входе в смесительную камеру, равное $\rho_2 \cdot (V_2)^2 / 2$; $(u - ж)$ – повышение статического давления по длине смесительной камеры, равное

$$\Delta P_{см} - \rho_3 \cdot V_3 (V'_3 - V_3) - \xi \cdot \rho_3 \cdot V_3^2 / 2;$$

$(л - ж)$ – величина динамического давления на выходе из смесительной камеры, равная $P_{см} = \rho_3 \cdot V_3^2 / 2$; $(h - r)$ – повышение статического давления в диффузоре, равное $\Delta P_{диф} = (1 - \xi_{диф}) \cdot \rho_3 \cdot V_3^2 / 2$; $(a - c)$ – величина разрежения у среза сопловой насадки.

Основная часть. Способность эжектора создавать значительное разрежение при отсосе газа позволяет на его входе применить очистное

устройство с эффективностью, достаточной для рециркуляции очищенной газовой смеси.

Для эффективного побуждения отсоса ВВВ с применением энергетически эффективной эжекторно-очистной установки потребовалась разработка математических зависимостей, позволяющих увязать характеристики процессов эжектирования газовых потоков, очистки технологических выбросов и рециркуляции очищенного газового потока. Для этого необходимо было определить ограничения и допущения при определении их параметров. Такими граничными условиями, определенных на основе анализа ранее выполненных исследований и экспериментальных работ, являются следующие положения.

1. В системе локализирующей вентиляции скорость поступающего воздуха в укрытие через проем должна быть равна или больше минимальной скорости, препятствующей выносу вредных из укрытия.

2. В укрытии должны реализоваться такие скорости воздуха над поверхностью вещества и разрежения при отсосе ВВВ, которые не интенсифицировали бы процесс испарения ВВВ с их источника. Изменение удельной скорости парообразования веществ $m_n, кг/м^2 \cdot с$, может быть определено по зависимости [8]:

$$m_n = 10^{-6} \cdot k_u \cdot P_s \cdot \sqrt{M}, \quad (1)$$

где M – молекулярная масса испаряющегося вещества; P_s – давление насыщенного пара, кПа; k_u – коэффициент испаряемости вещества, зависящий от скорости воздушного потока над поверхностью ВВВ или его раствором. Значения коэффициента k_u при различных температурах испаряющегося вещества приведены в таблице 1 [8].

Таблица 1

Значения коэффициента при различных температурах испаряющегося вещества

Скорость воздуха, $V_e,$ м/с	Коэффициент испаряемости k_u при температурах, °С:				
	10	15	20	30	35
0	1	1	1	1	1
0,1	3,0	2,6	2,4	1,8	1,6
0,5	6,6	5,7	5,4	3,6	3,2
1,0	10	8,7	7,7	5,6	4,6

3. Влияние величины разрежения на испаряемость вредного вещества определяется коэффициентом испарения k_p , зависящим от давления паров на поверхности испарения P_{st} и разрежения в укрытии P_p . Осредненное значение коэффициента испарения $k_p, кг/м^2 \cdot ч$ по экспериментальным данным [12] приведено в таблице 2.

Полученные данные свидетельствуют о преимущественном влиянии скорости воздуха над поверхностью испарения по сравнению с влиянием создаваемого разрежения в укрытии при отсосе газа эжектором, поскольку испаряемость существенно зависит от разности между давлением паров на поверхности испаряющегося вещества и на удалении от неё.

Таблица 2

Осредненное значение коэффициента испарения экспериментальным данным

Температура испарения вещества, °С	Температура вещества, °С	Температура окружающей среды, °С	Скорость движения воздуха, м/с	Давление окружающей среды, мм. рт. ст.	Коэффициент удельного испарения, кг/м ² ·ч
70	20	20	1,7	750	2,2
	18	18	0,7	750	1,6
	17	16	0,7	750	1,5
	25	20	0,0	650	2,0
	30	20	0,0	550	2,8
	40	20	0,0	460	3,5
	40	20	0,0	370	7,2
15	10	20	1,9	750	6,0
	18	18	1,7	750	8,0
	16	20	0,0	650	25
	16	20	0,0	460	220
	16	20	0,0	370	425

4. Скорость конвективного (теплого) потока газа из источника выделения ВВВ в укрытии и поток газовой смеси не должны быть существенно трансформированы поступающим в укрытие воздухом из помещения. Их можно определить по выражениям [15]:

$$V_o = 0,136(Q/z)^{1/3}, \text{ м/с} \quad (2)$$

$$L_o = 19(Q/z^5)^{1/3}, \text{ м}^3/\text{с}, \quad (3)$$

где Q , ккал/ч, – выделяемый источником тепловой поток, z , м, – расстояние от поверхности источника ВВВ.

5. Скорость поступающего воздуха для большинства видов укрытий составляет 0,7 – 1,5 м/с. Поступающий расход воздуха в проем укрытия источника выделения ВВВ должен удовлетворять определенным требованиям, к примеру, при окрасочных работах [8] должен соответствовать условиям:

$$L_o \geq \sqrt[3]{0,1Q \cdot h \cdot F^2}, \quad (4)$$

$$L_o \geq \frac{2 \cdot m_o \cdot k}{C_{\text{НКПВ}}}, \quad (5)$$

где m_o – массовый расход выделяющихся ВВВ, г/ч, $C_{\text{НКПВ}}$ – нижний концентрационный предел взрываемости вещества, г/м³, коэффициент $k = 2$ при температуре ВВВ $t \leq 90$ °С и $k = 5$ при $t = 200$ °С. Для других веществ коэффициент k будет иным.

6. При одновременном выделении в укрытии нескольких взрывоопасных веществ объем воздухопритока определяется по веществу с наименьшей температурой взрываемости [4].

7. При установлении режима воздухообмена в укрытии следует учитывать влияние температуры на скорость восходящих потоков ВВВ. В таблице 3 приведены значения скорости восходящих потоков V_z в зависимости от расстояния до поверхности выделения тепловых потоков [4].

Таблица 3

Зависимость скорости восходящих потоков от расстояния до поверхности выделения тепловых потоков

Высота, z , м	Скорость восходящих потоков V_o , м/с, при температуре источника, °С:						
	20	30	40	50	60	70	80
0,05	0,3	0,34	0,4	0,43	0,45	0,5	0,67
0,15	0,34	0,38	0,45	0,5	0,55	0,6	0,74
0,25	0,38	0,43	0,5	0,56	0,6	0,68	0,8
0,35	0,4	0,46	0,54	0,6	0,66	0,73	0,86
0,45	0,4	0,46	0,55	0,63	0,7	0,77	0,9
0,55	0,36	0,45	0,57	0,66	0,73	0,8	0,93
0,65	0,34	0,44	0,58	0,68	0,75	0,82	0,96
0,75	0,32	0,44	0,58	0,69	0,77	0,85	0,98

Из приведенных данных следует, что температура источника определяет скорость подъема вредных выделений, градиент которой увеличивается с удалением от поверхности источника. Горизонтальная составляющая скорости воздуха, подтекающей к факелу ВВВ, равна [4]:

$$V_x = 0,026/r \cdot (Q/z^2)^{1/3}, \quad (6)$$

где r – радиус источника, м, Q – тепловой поток источника, ккал/с.

8. Для обеспечения рекомендуемой скорости поступления воздуха в укрытие V_6 (см. п. 5) скорость отсоса смеси эжектором из укрытия V_4 определяется зависимостью [4]:

$$\frac{V_6}{V_4 - V_6} = 0,8 \cdot (a/A)^{-1,4} \text{ при } a/A \leq 2$$

и

$$\frac{V_6}{V_4 - V_6} = 0,8 \cdot (a/A)^{-1,7} \text{ при } a/A > 2, \quad (7)$$

где, a – расстояние от воздушного проема укрытия до отверстия отсоса смеси, $A = F/\Pi$ – гидравлический радиус отверстия отсоса из укрытия.

9. Поступающий в укрытие воздушный поток не должен нарушать факел выделения ВВВ, поэтому расстояние оси входной щели проема должно быть на расстоянии от поверхности источника h_0 не менее высоты разгона струи в поджатом состоянии, равного двум эквивалентным диаметрам поверхности источника ВВВ [4]. Высота факела в поджатом с парами выделяющихся веществ над поверхностью испарения составляет 50...200 мм при температуре 20–50 °С, на больших высотах факел начинает размываться.

Предпочтительней является применение щелевой подачи воздуха в укрытие с расходом

$$L_6 \geq 473 \cdot l \cdot a \cdot V_6^2 / V_4, \quad (8)$$

$$L_1 \cdot \rho_1 V_1 + L_2 \cdot \rho_2 V_2 - (L_1 + L_2) \rho_3 V_3 = P_3 f_3 - P_1 f_1 - P_2 f_2. \quad (10)$$

В смесительной камере максимальная скорость газа, реализуемая в области интенсивного смешивания активного и отсасываемого газов, V_3^1 по мере стабилизации потока скорость снижается до значения V_3 и при этом будет происходить повышение давления на величину $\Delta P_{см} = (1 - \xi_k) \cdot V_3 \cdot (V_3^1 - V_3) \rho_3$, где ξ_k – коэффициент потерь в камере смешения. В диффузоре также будет происходить повышение давления на величину $\Delta P_{диф} = (1 - \xi_{диф}) \cdot \rho_3 V_3^2 / 2$, где $\xi_{диф}$ – коэффициент потерь в диффузоре. С учетом потребного разрежения для преодоления сопротивлений дросселя $1 - \Delta P_{др1}$, очистного устройства – $\Delta P_{оч}$ и создания разрежения в укрытии – $(P_6 - P_4)$ общее повышение давления с учетом превышения давления перед выбросом расхода смеси L_7 из эжекторно-

при обеспечении скорости струи, не разрушающей разгонную часть факела ВВВ,

$$V_y \leq \frac{3,7 \cdot V_6 \cdot \sqrt{b}}{\sqrt{y}} \quad (9)$$

при критерии Архимеда:

$$Ar = \frac{g \cdot y \cdot (T_o - T_6)}{V_6^2 \cdot T_o} \geq 0,884,$$

где l – длина щели, м; V_6 – скорость в проеме укрытия, м/с; V_4 – скорость газа в отсасывающем отверстии укрытия, м/с; b – ширина щели, м; y – расстояние от отверстия поступления воздуха в укрытие до оси факела выделения ВВВ; T_o – температура источника выделения ВВВ, К; T_6 – температура входящего воздуха, К.

Представленные математические зависимости, описывающие основные газодинамические процессы формирования выбросов в укрытии, их эжектирование и рециркуляцию, основаны на базовых уравнениях количества движения [13–15], баланса энергетических потоков [15–16] и баланса давлений в замкнутой системе с учетом исследуемой схемы эжекторно-очистной установки [17–18].

Уравнение количества движения газового потока для данной установки имеет вид:

очистной установки над атмосферным давлением – $\Delta P_{др2} = (P_7 - P_6)$ должно быть равно

$$\Delta P_3 = \Delta P_{см} + \Delta P_{диф} + \Delta P_{др2}. \quad (11)$$

Плотность смеси в укрытии равная

$$\rho_{см} = \frac{\rho_6 + L_o / L_6 \cdot \rho_o}{1 + L_o / L_6}, \text{ где } L_o \text{ – конвективный по-}$$

ток ВВВ. Плотность газа в смесительной камере

$$\text{будет равна } \rho_3 = \frac{\rho_2 + L_2 / L_1 \cdot \rho_1}{1 + L_2 / L_1}.$$

Полное давление, развиваемое побудителем, должно быть не менее полного сопротивления газового тракта перед смесительной камерой установки и обеспечения превышения давления перед дросселем над атмосферным давлением с учетом повышения давления в смесительной камере и диффузоре, то есть:

$$P_{1n} = (1 + \xi_n) \rho_1 V_1^2 / 2 - \Delta P_{др1} - \Delta P_{оч} + \rho_2 V_2^2 / 2 + \Delta P_{др2}, \quad (12)$$

где ξ_n – коэффициент потерь давления в сопловом насадке.

Следовательно, развиваемое давление вентилятором должно преодолеть сопротивление дросселя на выходе из укрытия – $\Delta P_{др1}$, сопротивление очистного устройства – $\Delta P_{оч}$, потерю давле-

ния, обусловленную взаимодействием смешиваемых двух упругих тел за счет их удара – $\Delta P_{см}$, создания разрежения в укрытии для предотвращения утечек ВВВ в помещение и обеспечить превышение давления P_7 над давлением окружающей среды.

Для составления уравнения баланса энергии введем ряд определений.

Энергия в выходном сечении насадки с учетом преодоления сопротивлений дроссельного и очистного устройств, создания движения отсасываемой газовой смеси и разрежения в укрытии – $(P_6 - P_4)$ равна:

$$E_1 = L_1(\rho_1 \cdot V_1^2/2 - \rho_2 \cdot V_2^2/2). \quad (13)$$

Энергия, затрачиваемая на преодоление сопротивлений перед эжектором:

$$E_2 = L_2[\Delta P_{оп1} + \Delta P_{оп} + (P_6 - P_4)]. \quad (14)$$

$$L_1[\rho_1 \cdot V_1^2/2 - \rho_2 \cdot V_2^2/2] = L_2[\Delta P_{оп1} + \Delta P_{оп} + (P_6 - P_4)] + (\xi_{см} + \xi_{диф}) \cdot L_3 \cdot \rho_3 \cdot V_3^2/2 + L_1 \cdot \rho_1(V_1^2 - V_2^2)/2 + L_2 \cdot \rho_2(V_2^2 - V_3^2)/2 + (L_3 - L_7) \cdot (P_7 - P_6) + L_1 \cdot \rho_3 \cdot V_3^2/2. \quad (18)$$

Скорость газа в смесительной камере определяется по зависимости [6]

$$V_3 = 1,41 \cdot \sqrt{\frac{\Delta P_{оп1} + \Delta P_{оп} + (P_6 - P_4)}{\eta_{диф} \cdot \rho_3 - (n_{эф})^2 \cdot \rho_2}}, \quad (19)$$

где $n_{эф}$ - наиболее выгодное значение отношения скоростей $n_{эф} = V_2/V_3$, которые представлены в таблице 4 в зависимости от отношения $\beta = L_2/L_1$. В ней также представлены зависимости от величины β наиболее предпочтительные отношения площадей сопловой насадки f_1 , площади проходного сечения отсасываемого газа f_2 и площади

Энергия, затрачиваемая в смесительной камере и теряемая в диффузоре при коэффициентах потерь в них $\xi_{см}, \xi_{диф}$, обозначив $L_1 + L_2 = L_3$:

$$E_{к.д.} = (\xi_{см} + \xi_{диф}) L_3 \cdot \rho_3 \cdot V_3^2/2. \quad (15)$$

Потеря энергии при смешивании потоков за счет удара активного газа и отсасываемого:

$$E_{см} = L_1 \cdot \rho_1(V_1^2 - V_2^2)/2 + L_2 \cdot \rho_2(V_2^2 - V_3^2)/2. \quad (16)$$

Энергия, теряемая во всасывающем воздуховоде вентилятора:

$$E_{вс} = (L_3 - L_7) \cdot P_7 + L_1 \cdot \rho_3 \cdot V_3^2/2. \quad (17)$$

Уравнение баланса энергии для исследуемой схемы газовых потоков имеет вид:

смесительной камеры f_3 , а также отношение скоростей газа на входе в смесительную камеру и на выходе из неё V_2/V_3 . Приведенные в таблице 4 данные соответствуют наиболее эффективному к. п. д. смесительной камеры и диффузора, равных $\eta_{см} = 0,85, \eta_{диф} = 0,85$ [8].

Знание площади поперечного сечения смесительной камеры позволяет определить по диаметру камеры d_3 длину диффузора $l_{диф} = (6 - 8) d_3$, приняв угол раскрытия образующих диффузора $\alpha = 8 - 10^\circ$.

Таблица 4

Предпочтительные режимные параметры установки

β	0,5	0,8	1,0	2,0	4,0	6,0	10
$n_{эф}$	0,46	0,526	0,551	0,61	0,664	0,717	0,75
f_3/f_2	1,38	1,18	1,1	0,955	0,87	0,835	0,825
f_3/f_1	2,19	2,83	3,28	5,76	12,1	19,8	39,81
V_2/V_3	0,52	0,585	0,613	0,688	0,736	0,767	0,793

Скорость газа на выходе из сопловой насадки равна:

$$V_1 = V_3 [1 + \beta (1 - V_2/V_3)]. \quad (20)$$

Статический коэффициент полезного действия эжектора в составе рассматриваемой установки равен:

$$\eta_{см} = \frac{L_2 [\Delta P_{оп1} + \Delta P_{оп} + (P_6 - P_4) + \Delta P_7]}{L_1 (\rho_1 \cdot V_1^2/2 - \rho_2 \cdot V_2^2/2)}. \quad (21)$$

Из зависимости (21) следует, что определяющим фактором, влияющим на достигаемый коэффициент полезного действия, является гидравлическое сопротивление очистной установки, поэтому при выборе способа очистки выбросов от химически вредных веществ следует это учитывать. Разница давлений $P_7 - P_6$ должна быть минимальной, но одновременно обеспечивать выброс расхода смеси из установки в атмосферный воздух L_7 , равный поступившему воздуху в укрытие L_6 .

Результат. При использовании разработанного алгоритма на основе приведенных выше зависимостей полученные характеристики эжекторно-очистной установки, представленные на рис. 2-4, позволяют для различных режимов работы определить наиболее рациональное решение.

Экономическая эффективность эжекторно-очистной установки с рециркуляцией очищенной смеси не может определяться только коэффициентом полезного действия газового эжектора. Следует учитывать снижение потребляемой энергии за счет снижения требуемой величины притока воздуха на величину уменьшенного выброса в помещение ВВВ из укрытия и уменьшенного потребления отсасываемого воздуха из помещения в укрытие за счет внедрения рециркуляции воздуха [19-21].

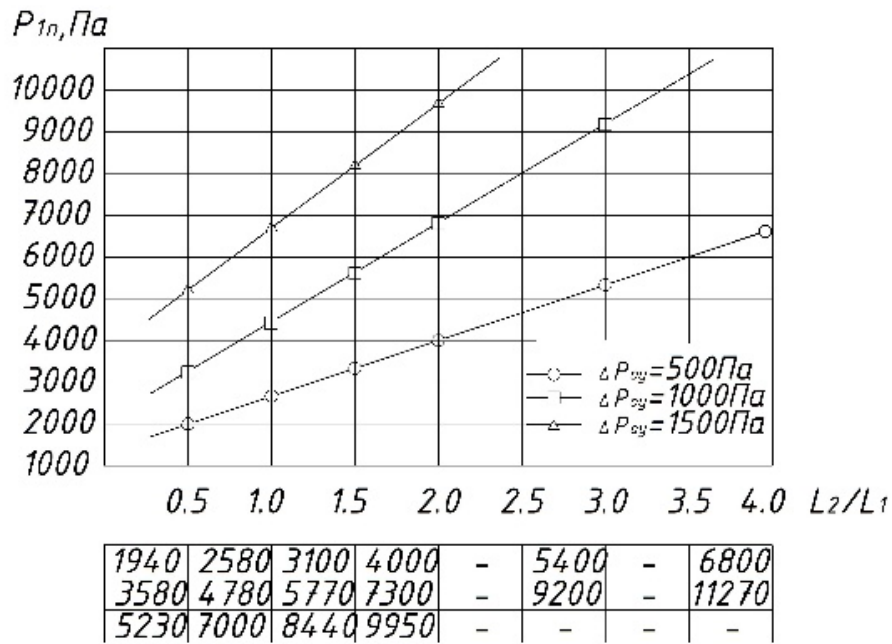


Рис. 2. Зависимость полного давления вентилятора от отношения расходов отсасываемого и активного газа

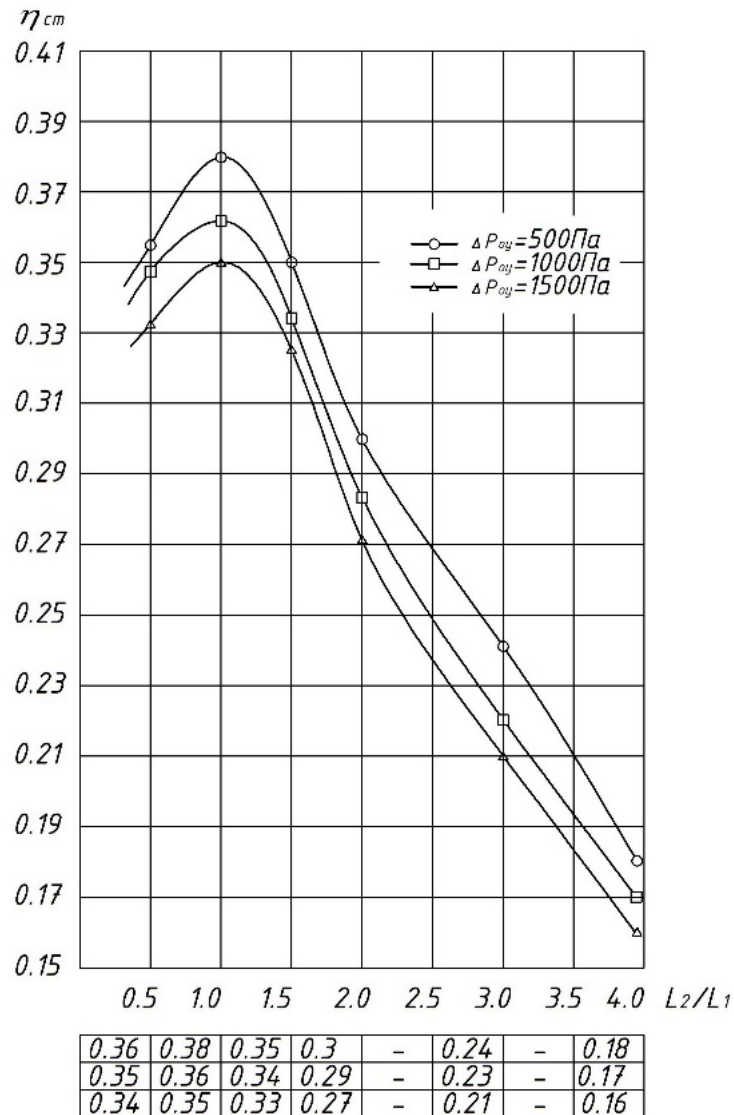


Рис. 3. Зависимость КПД эжектора от отношения расходов отсасываемого и активного газа

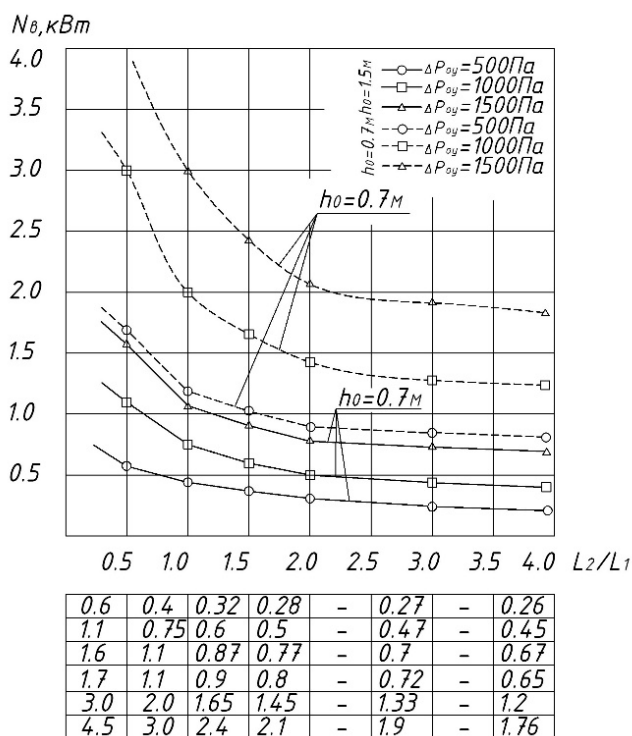


Рис. 4. Зависимость мощности вентилятора от отношения расходов отсасываемого и активного газа при различной высоте движения воздуха h_0 над поверхностью испарения ВВВ

Кроме этого, следует сопоставить мощность, потребляемую вентилятором без эжектора при разбавлении выделяемых выбросов до концентрации не выше 30 % НКПВ с мощностью вентилятора, подающего активный воздух в эжектор и работающий в режиме рециркуляции очищенного активного газа.

Если, к примеру, для отсоса выделяемых ВВВ с расходом конвективного потока $L_0 = 0,2 \text{ м}^3/\text{с}$ при длинах всасывающего и напорного воздухопроводов по 5 м, скорости газа $V_2 = 25 \text{ м}/\text{с}$, тогда потребная производительность вентилятора при разбавлении выбросов не менее чем на 30 % НКПВ составит не менее $L_2 = 0,66 \text{ м}^3/\text{с}$. Развиваемое вентилятором давление без эжектора должно быть равно $P_1 = (P_в - P_4) + (1 + \xi)\rho \cdot V_2^2/2 = 520 \text{ Па}$ при $(P_в - P_4) = 50 \text{ Па}$. Мощность вентилятора составит 0,5 кВт. Для подачи активного газа в эжектор с параметрами $\beta = 1$, $V_2/V_3 = 0,613$ (см. табл. 4), $V_1 = 1,387 V_3$ (из зав. 20), $V_3 = 40,8 \text{ м}/\text{с}$, тогда $V_1 = 56,6 \text{ м}/\text{с}$ и давление, развиваемое вентилятором, составит величину $P_1 = 1369 \text{ Па}$ при расходе газа $L_1 = 0,2 \text{ м}^3/\text{с}$. С учетом гидравлического сопротивления воздухопроводов длиной до 2 м потребная мощность вентилятора составит 0,42 кВт. Более достоверное определение экономического преимущества рассматриваемой установки определяется для конкретного воздухообмена помещения.

Выводы. В результате выполненных аналитических исследований и использования результатов ранее выполненных экспериментальных

работ показано преимущество применения эжекторной установки вместо вентилятора во взрывобезопасном исполнении при применении в её составе очистной установки. Применение на взрывоопасных предприятиях эжекторно-очистной установки позволяет обеспечить экономию энергетических ресурсов в системах местной и приточной вентиляции, а также безопасность и нормируемые экологические показатели.

Источник финансирования. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 18-79-10025).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шепс Р.А., Шашин А.В., Жерлыкина М.Н., Шичкин В.В. Определение энергетической эффективности механической вентиляции помещений с выделением вредных веществ // Жилищное хозяйство и коммунальная инфраструктура. 2019. № 2 (9). С. 62–68.
2. Kireev V.M., Goltsov A.B., Seminenko A.S., Ovsyannikov Y.G. Creation of a new energy-efficient design of the dustexhaust system // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. № 552(1). 012021.
3. Sheremet E.O., Seminenko A.S., Goltsov A.B., Podporinov B.F. Efficiency of dust separating devices in ventilation emission cleaning systems // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. № 327(4). 042081.
4. Батурин М.В. Основы промышленной вентиляции. М.: Профиздат, 1990. 446с.

5. Логачёв И.Н., Логачёв К.И., Аверкова О.А. Энергосбережение в аспирации. Теоретические предпосылки и рекомендации // Москва, Ижевск, 2013.
6. Бесчастнов М.В. Промышленные взрывы. Оценка, предупреждение. М.: "Химия", 1991. 431 с.
7. Rickenbacker H.J., Collinge W.O., Hasik V. et al. Development of a framework for indoor air quality assessments in energy conservation districts // Sustainable Cities and Society. 2020. 52. 101831
8. Бромлей М.Ф., Щеглов В.П. Проектирование отопления и вентиляции. М.: Издательство по строительству, 1965. 257 с.
9. Каменев П. Н. Отопление и вентиляция. Часть 2 – Вентиляция. М.: Издательство по строительству, 1964. 470 с.
10. Logachev K.I., Averkova O.A., Tolmacheva E.I., Logachev A.K., Dmitrienko V.G. Modeling of Air and Dust Flows in the Range of Action of a Round Suction Funnel Above an Impermeable Plane. Part 1. A Mathematical Model and Algorithm for its Computer Implementation, Refract. Ind. Ceram. 2016. № 56. Pp. 679–683.
11. Pietrowicz S., Kolasiński P., Pomorski M. Experimental and numerical flow analysis and design optimization of a fume hood using the CFD method. Chemical Engineering Research and Design 2018. 132. Pp. 627–643.
12. Скрыпник А.И. Исследование условий образования и распространения выбросов при испытании ЖРД. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук Воронеж, БХХА, 1969. 150 с.
13. Yang Y., Wang Y., Song B., Fan J., Cao Y. Stability and accuracy of numerical investigation of droplet motion under local ventilation airflow, Build. Environ. 2018. № 140. Pp. 32–42.
14. Jeong S.-H., Kwon H.-M., Ahn S.-J., Yang J.-H. A Study on the Improvement of Ventilation Rate Using Air-flow Inducing Local Exhaust Ventilation System, J. Asian Archit. Build. Eng. 2016. №15. Pp. 119–126.
15. Эльтерман В.М. Вентиляция химических производств. М.: "Химия", 1980. 197 с.
16. Шашин А.В. Влияние геометрических характеристик укрытия шкафного типа местной вытяжной вентиляции на эффективность работы по удалению ВХВ // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2010. № 1 (26). С. 165–171.
17. Kireev V.M., Buryanov I.A., Minko V.A., Seminenko A.S., Goltsov A.B. Determination of the height of aspiration shelter funnel // International Journal of Pharmacy and Technology. 2016. № 8(4). pp. 22538–22544
18. Лобанов Д.В., Шепс Р.А., Портнова Н.В. Экспериментальные исследования энергоэффективности работы систем климатизации в офисном помещении // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2018. Т. 14. № 3. С. 71–79.
19. Zhou B., Wei P., Tan M., Xu Y., Ding L., Mao X., Zhao Y., Kosonen R. Capture efficiency and thermal comfort in Chinese residential kitchen with push-pull ventilation system in winter-a field study, Build. Environ. 2019. № 149. Pp. 182–195.
20. Huang Y., Wang Y., Liu L., Nielsen P.V., Jensen R.L., Yan F. Reduced-scale experimental investigation on ventilation performance of a local exhaust hood in an industrial plant, Build. Environ. 2015. № 85. Pp. 94–103.
21. Jaremenko S.A., Garmonov K.V., Sheps R.A. Research of air pollution by dust aerosols during construction // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering International Conference on Construction, Architecture and Technosphere Safety (ICCATS 2017). 2017. 012189.

Информация об авторах

Шашин Алексей Викторович, кандидат технических наук, доцент кафедры жилищно-коммунального хозяйства. E-mail: ingvent@mail.ru. Воронежский государственный технический университет. Россия, 394006, Воронеж, ул. 20 летия Октября, д. 84.

Шепс Роман Александрович, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры жилищно-коммунального хозяйства. E-mail: romansheps@yandex.ru. Воронежский государственный технический университет. Россия, 394006, Воронеж, ул. 20 летия Октября, д. 84.

Семенов Артем Сергеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры теплогазоснабжения и вентиляции. E-mail: seminenko.as@gmail.com. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Минко Всеволод Афанасьевич, доктор технических наук, профессор кафедры теплогазоснабжения и вентиляции. E-mail: va.minko@gmail.com. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 28.07.2020 г.

© Шашин А.В., Шепс Р.А., Семиненко А.С., Минко В.А., 2021

¹*Shashin A.V.*, ^{1*}*Sheps R.A.*, ²*Semenenko A.S.*, ²*Minko V.A.*

¹*Voronezh state technical University*

²*Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov*

*E-mail: romansheps@yandex.ru

LOCAL EXHAUST VENTILATION WITH EJECTION OF EXPLOSIVE SUBSTANCES AND RECIRCULATION OF PURIFIED AIR

Abstract. Exhaust ventilation systems in industrial enterprises and facilities with the use of harmful substances largely determine the air exchange in the workplace to ensure normalized sanitary and hygienic conditions and operating costs. Local exhaust ventilation of explosive harmful substances is of particular importance for effective air exchange in such rooms, since their localization, suction and transportation are subject to increased requirements. The paper presents the results of analytical and experimental studies of the operation mode of a complex local exhaust device with a gas ejector for extraction explosive harmful chemicals from shelters, ensuring their effective localization, purification and recirculation of air. The boundary conditions and assumptions for calculating the characteristics of the processes of gas flow ejection, purification of technological emissions and recirculation of the purified gas flow, determined on the basis of the analysis of previously performed studies and experimental work, are given. The conditions of rational ratios device settings of extraction of emissions sources of substances that parameters of the ejector and cleaning device emission, which is achieved economic and environmental efficiency of the installation and excludes the volatile situation on the threat of chemical enterprises and objects.

Keywords: local exhaust ventilation, explosive substances, ejector, recirculation, energy efficiency of ventilation systems, ejection calculation.

REFERENCES

1. Sheps R.A., Shashin A.V., Zherlykina M. N., Shichkin V. V. Determination of the energy efficiency of mechanical ventilation of premises with the release of harmful substances [Opredelenie energeticheskoy effektivnosti mekhanicheskoy ventilyacii pomeshchenij s vydeleniem vrednyh veshchestv]. Housing and communal infrastructure. 2019. No. 2 (9). Pp. 62–68.
2. Kireev V.M., Goltsov A.B., Seminenko A.S., Ovsyannikov Y.G. Creation of a new energy-efficient design of the dustexhaust system. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. No. 552(1). 012021.
3. Sheremet E.O., Seminenko A.S., Goltsov A.B., Podporinov B.F. Efficiency of dust separating devices in ventilation emission cleaning systems. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. No. 327(4). 042081.
4. Baturin M. V. Fundamentals of industrial ventilation [Osnovy promyshlennoj ventilyacii]. Moscow: Profizdat, 1990. 446 p.
5. Logachov I.N., Logachov K.I., Averkova O.A. Energy saving in aspiration. Theoretical background and recommendations [Energoberezhenie v aspiracii. Teoreticheskie predposylki i rekomendacii]. Moskva, Izhevsk, 2013.
6. Beschastnov M.V. Industrial explosions. Assessment, warning [Promyshlenny'e vzryvy'. Ocenka, preduprezhdenie]. M.: "Chemistry", 1991. 431 p.
7. Rickenbacker H.J., Collinge W.O., Hasik V. et al. Development of a framework for indoor air quality assessments in energy conservation districts. Sustainable Cities and Society. 2020. 52. 101831
8. Bromley M.F., Shcheglov V.P. Design of heating and ventilation [Proektirovanie otopleniia i ventilyacii]. Moscow: publishing house on construction, 1965. 257 p.
9. Kamenev P.N. Heating and ventilation. Part 2-Ventilation [Otoplenie i ventilyacii. Chast' 2 – Ventilyacii.]. Moscow: publishing house for construction, 1964. 470 p.
10. Logachev K.I., Averkova O.A., Tolmacheva E.I., Logachev A.K., Dmitrienko V.G. Modeling of Air and Dust Flows in the Range of Action of a Round Suction Funnel Above an Impermeable Plane. Part 1. A Mathematical Model and Algorithm for its Computer Implementation, Refract. Ind. Ceram. 2016. No. 56. Pp. 679–683.
11. Pietrowicz S., Kolasiński P., Pomorski M. Experimental and numerical flow analysis and design optimization of a fume hood using the CFD method. Chemical Engineering Research and Design 2018. 132. Pp. 627–643.
12. Skrypnik A.I. Research of conditions of formation and distribution of emissions during testing of the liquid-gas engine [Issledovanie uslovij obrazovaniia i rasprostraneniia vybrosov pri ispytanii ZHRD]. Dissertation for the degree of candidate of technical Sciences Voronezh, KBHA, 1969. 150 p.

13. Yang Y., Wang Y., Song B., Fan J., Cao Y. Stability and accuracy of numerical investigation of droplet motion under local ventilation airflow, *Build. Environ.* 2018. No. 140. Pp. 32–42.
14. Jeong S.-H., Kwon H.-M., Ahn S.-J., Yang J.-H. A Study on the Improvement of Ventilation Rate Using Air-flow Inducing Local Exhaust Ventilation System, *J. Asian Archit. Build. Eng.* 2016. No. 15. Pp. 119–126.
15. Elterman V.M. Ventilation of chemical production [Ventiliatsiia himicheskikh proizvodstv]. Moscow: "Chemistry", 1980. 197 p.
16. Shashin A.V. Influence of geometric characteristics of the Cabinet-type shelter of local exhaust ventilation on the efficiency of work to remove vxv [Vliianie geometricheskikh harakteristik ukry'tiia shkafnogo tipa mestnoi' vy'tiazhnoi' ventiliatsii na e'ffektivnost' raboty' po udaleniiu VKHV]. *Bulletin of the Tomsk state University of architecture and construction.* 2010. No. 1 (26). Pp. 165–171.
17. Kireev V.M., Buryanov I.A., Minko V.A., Seminenko A.S., Goltsov A.B. Determination of the height of aspiration shelter funnel. *International Journal of Pharmacy and Technology.* 2016. No. 8(4). Pp. 22538–22544
18. Lobanov D.V., Sheps R.A., Portnova N.V. Experimental studies of energy efficiency of climate control systems in office premises [E'ksperimental'ny'e issledovaniia e'nergoe'ffektivnosti raboty' sistem klimatizatsii v ofisnom pomeshchenii]. *Bulletin of the Voronezh state technical University.* 2018. Vol. 14, No. 3. Pp. 71–79.
19. Zhou B., Wei P., Tan M., Xu Y., Ding L., Mao X., Zhao Y., Kosonen R. Capture efficiency and thermal comfort in Chinese residential kitchen with push-pull ventilation system in winter-a field study, *Build. Environ.* 2019. No. 149. Pp. 182–195.
20. Huang Y., Wang Y., Liu L., Nielsen P.V., Jensen R.L., Yan F. Reduced-scale experimental investigation on ventilation performance of a local exhaust hood in an industrial plant, *Build. Environ.* 2015. No. 85. Pp. 94–103.
21. Jaremenko S.A., Garmonov K.V., Sheps R.A. Research of air pollution by dust aerosols during construction. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering International Conference on Construction, Architecture and Technosphere Safety (ICCATS 2017).* 2017. 012189.

Information about the authors

Shashin, Alexey V. PhD. E-mail: ingvent@mail.ru. Voronezh state technical University associate Professor of the Department of housing and communal services. Russia, 394006, Voronezh, ul. 20 letiya Oktyabrya, d. 84.

Sheps, Roman A. Senior lecturer. E-mail: romansheps@yandex.ru. Voronezh state technical University. Russia, 394006, Voronezh, ul. 20 letiya Oktyabrya, d. 84.

Semenenko, Artem S. PhD. E-mail: semenenko.as@gmail.com. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Minko Vsevolod A. DSc, Professor. E-mail: va.minko@gmail.com. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Received 28.07.2020

Для цитирования:

Шашин А.В., Шепс Р.А., Семенов А.С., Минко В.А. Местная вытяжная вентиляция с эжектированием взрывоопасных веществ и рециркуляцией очищенного воздуха // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2021. № 2. С. 38–48. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-2-38-48

For citation:

Shashin A.V., Sheps R.A., Seminenko A.S., Minko V.A. Local exhaust ventilation with ejection of explosive substances and recirculation of purified air. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov.* 2021. No. 2. Pp. 38–48. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-2-38-48