

УДК 697

Осипова Л.Э. – кандидат технических наук, доцент

E-mail: osipovalilija@mail.ru

Казанский государственный архитектурно-строительный университет

Адрес организации: 420043, Россия, г. Казань, ул. Зеленая, д. 1

Осипов Э.В. – кандидат технических наук, доцент

E-mail: eduardvosipov@gmail.com

Казанский национальный исследовательский технологический университет

Адрес организации: 420015, Россия, г. Казань, ул. К. Маркса, д. 68

К расчету вытяжной эжекционной системы вентиляции окрасочной камеры

Аннотация

Постановка задачи. При проектировании систем вентиляции окрасочных отделений промышленных зданий особое внимание уделяется вопросам безопасности, так как все лакокрасочные покрытия – коррозионно-активные и легкогорючие вещества. Кроме того, пары растворителей являются взрывоопасными. Так для локальной вентиляции окрасочных камер рационально использовать безопасные эжекционные системы. Они хорошо зарекомендовали себя не только в высотных жилых и административных зданиях, сегодня они находят широкое применение и при вентиляции производственных помещений. Эжектор прост по конструкции, может работать в широком диапазоне изменения параметров состояния воздушных потоков.

Результаты. Проведен расчет и спроектирован эжектор низкого давления для типовой окрасочной камеры. Синтезирована модель эжекционной системы вентиляции с использованием универсального моделирующего пакета ChemCad, который содержит весьма развитую базу данных для решения различных прикладных задач.

Выводы. Полученные результаты могут быть рекомендованы при проектировании системы вентиляции окрасочных камер, как новых, так и подлежащих реконструкции. Использование программного обеспечения позволяет проводить многовариантные расчеты, без которых невозможно решение оптимизационных задач.

Ключевые слова: окрасочная камера, рациональное проектирование, промышленная вентиляция, эжекционная система.

Хорошо известны проблемы с микроклиматом, которые возникают в многоэтажных жилых зданиях, где запроектирована система вентиляции с естественным побуждением [1-4]. Одним из эффективных способов стабилизации работы вытяжной системы вентиляции жилых зданий является использование эжекционных систем. В работах [5-6] приведено описание ряда модульных вытяжных систем вентиляции, где используется метод эжекции, и которые стабильно работают, не зависимо от климатических условий.

В промышленности вентиляция обеспечивает не только нормативные параметры воздушной среды в производственном помещении, но и создает необходимые условия для функционирования технологического оборудования. Если удаляемый воздух содержит взрывоопасные или агрессивные газы, а также твердые взвешенные примеси, то задачи вентиляции усложняются, и для каждого отдельного случая проектируется своя приточно-вытяжная система, учитывающая особенности технологического процесса. В работах [7-8] предложено удалять взрывоопасные и действующие разрушающие на вентилятор примеси методом эжекции.

Эффект эжекции заключается в том, что эжектирующий поток (активный) с более высоким давлением, движется с большой скоростью, увлекает за собой эжектируемый поток (пассивный) низкого давления. На рис. 1 представлена конструкция эжектора. Воздух, нагнетаемый расположенным вне вентилируемого оборудования вентилятором 5 высокого давления, истекает из сопла 1 в смесительную камеру 3, в которую под действием разницы давлений подсасывается воздух из приемной камеры 2, удаляемый из окрасочной камеры. Далее смесь активного и пассивного потоков через диффузор 4 и воздуховод выводятся в атмосферу.

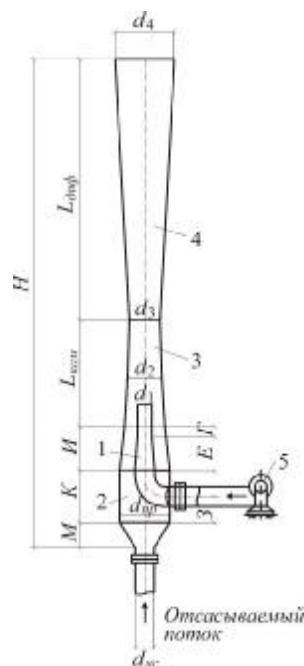


Рис. 1. Схема эжектора: 1 – сопло; 2 – приемная камера; 3 – камера смешения; 4 – диффузор; 5 – вентилятор

В работе Фиалковской Т.А. «Вентиляция при окраске изделий» предлагаются решения по организации рациональной вентиляции окрасочных цехов разнообразных изделий – от мелких деталей до крупногабаритных изделий. Далее все необходимые данные по размеру окрасочной камеры, расходу, температуре и скорости воздушных потоков приняты согласно этим рекомендациям.

Рассмотрим методику определения требуемых характеристик механической приточно-вытяжной вентиляции внутреннего пространства окрасочной камеры размером 5,4×3,4×2,5 м. Приточный воздух подается сверху равномерно по всей площади подшивного потолка. Отсос воздуха осуществляется по центру камеры, пол которой по всей площади оборудован напольными решетками. Приток и вытяжка проходят систему очистки. Минимальная температура – 20-25 °С (в режиме сушки до 50 °С). Движение воздуха в зоне покраски 20-25 см/с. Давление воздуха в камере чуть выше стандартных 100 кПа (атмосферное давление или давление снаружи).

Примем количество приточного воздуха 6600 м³/ч. Для обеспечения подпора требуется удалить 6000 м³/ч воздуха при сопротивлении всасывающей сети $\Delta p_2 = 230$ Па; сопротивление напорной части эжектора $\Delta p_3 = 80$ Па; коэффициент помешивания $w = 1$.

Так как при нанесении лакокрасочных материалов в объем окрасочной камеры поступают легковоспламеняющиеся растворители и их пары, которые взрывоопасны и коррозионноактивны, а лакокрасочные покрытия – легкогорючие вещества, то при проектировании вентиляции камеры предлагается использовать эжекционную вытяжную систему вентиляции. При конструировании оборудования на принципах эжекции необходимо определить оптимальную форму и геометрические размеры эжектора, а также характеристики вентилятора, учитывая, что мощность, потребляемая его электроприводом, определяет существенную долю затрат на проведение процесса окраски.

Основным расчетным параметром эжектора является коэффициент эжекции, под которым понимают отношение расхода активного (нагнетаемого вентилятором) потока к расходу пассивного (подсасываемого из окрасочной камеры) потока. Чем больше коэффициент эжекции, тем меньше расход подаваемого активного потока, и, тем самым, меньше электроэнергии потребляет вентилятор. Сам же коэффициент эжекции является функцией, зависящей от геометрических характеристик эжектора, поэтому нахождение оптимальной геометрии эжектора позволит снизить как эксплуатационные, так и капитальные затраты на установку системы вентиляции.

При моделировании эжектор разделяем на три части: сопло, камера смешения и диффузор.

Давление и температура на срезе сопла определяется по соотношениям (1) и (2):

$$\frac{P_1}{P_2} = \left[1 + \frac{\gamma-1}{2} M^2 \right]^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}, \quad (1)$$

$$\frac{T_1}{T_2} = 1 + \frac{\gamma-1}{2} M^2. \quad (2)$$

Основное соотношение, использованное при моделировании эжектора:

$$\frac{A_2}{A_c} = \sqrt{\frac{\left[\left(\frac{2}{1+\gamma_1} \right) \left(1 + \frac{\gamma_1-1}{2} M_2^2 \right) \right]^{\frac{\gamma_1+1}{\gamma_1-1}}}{M_2^2}}. \quad (3)$$

Давление на выходе из сопла рассчитывается следующим образом:

$$P_2 = \frac{P_1}{\left[\frac{\gamma_1-1}{2\eta_c} M_2^2 + 1 \right]^{\frac{\gamma_1}{\gamma_1-1}}}. \quad (4)$$

Температуры в выходе из сопла:

$$T_2 = \frac{T_1}{1 + \frac{\gamma_1-1}{2\eta_c} M_2^2}. \quad (5)$$

Скорость звука:

$$C_2 = \sqrt{\gamma_1 R_1 T_2}, \quad (6)$$

Фактическая скорость потока:

$$V_2 = C_2 M_2. \quad (7)$$

Число Маха до смешения активного и эжектируемого потоков в сопле выражено формулой:

$$M_{v_2} = \sqrt{\frac{2}{\gamma_2-1} \left[\left(\frac{P_v}{P_2} \right)^{\frac{\gamma_2-1}{\gamma_2}} - 1 \right]}. \quad (8)$$

В общем случае, для получения критического числа Маха в любом сечении i , можно использовать следующее соотношение:

$$M_i^* = \sqrt{\frac{M_i^2 (\gamma+1)}{M_i^2 (\gamma-1) + 2}}. \quad (9)$$

Если учитывать уравнение (9), то критическое число Маха на срезе сопла рассчитывается по формуле:

$$M_2^* = \sqrt{\frac{M_2^2 (\gamma_2+1)}{M_2^2 (\gamma_2-1) + 2}}. \quad (10)$$

По определению, соотношение для коэффициента эжекции вычисляется по формуле:

$$w = \frac{m_v}{m_1}. \quad (11)$$

Критическое число Маха движущегося потока на выходе из сопла до смешения с эжектируемым потоком:

$$M_{v_2}^* = \sqrt{\frac{M_{v_2}^2 (\gamma_1+1)}{M_{v_2}^2 (\gamma_1-1) + 2}}. \quad (12)$$

При моделировании процесса смешения одномерные уравнения неразрывности в сочетании с уравнениями движения и уравнениями энергии могут быть объединены в следующие соотношения для расчета критического числа Маха и числа Маха в диффузоре:

$$M_4^* = \frac{M_2^* + w M_{v_2}^* \sqrt{\frac{T_v}{T_1}}}{\sqrt{(1+w) \left(1 + w \frac{T_v}{T_1} \right)}}, \quad (13)$$

$$M_4 = \frac{\sqrt{2} M_4^*}{\sqrt{(\gamma_3+1) - M_4^{*2} (\gamma_3-1)}}. \quad (14)$$

Для расчета смешанного активного и эжектируемого потока перед выхлопом используется следующее соотношение:

$$T_4 = \frac{T_2}{1 + \frac{\gamma_3-1}{2} M_4^2}. \quad (15)$$

Число Маха на входе и выходе из диффузора:

$$M_5 = \sqrt{\frac{M_4^2 + \frac{2}{\gamma_3 - 1}}{\frac{2\gamma_3}{\gamma_3 - 1} M_4^2 - 1}}, \quad (16)$$

$$M_3 = \sqrt{\frac{M_5^2 + \frac{2}{\gamma_3 - 1}}{\frac{2\gamma_3}{\gamma_3 - 1} M_5^2 - 1}}. \quad (17)$$

Нужно отметить, что для расчета температуры и давления на входе в диффузор используются следующие соотношения:

$$T_3 = \frac{T_2}{1 + \frac{\gamma_3 - 1}{2} M_3^2}, \quad (18)$$

$$P_3 = \frac{P_2}{\left(1 + \frac{\gamma_3 - 1}{2} M_3^2\right)^{\frac{\gamma_3}{\gamma_3 - 1}}}. \quad (19)$$

Скорость звука и фактическая скорость определяют по следующим зависимостям:

$$C_3 = \sqrt{\gamma_3 R_3 T_3}, \quad (20)$$

$$C_4 = \sqrt{\gamma_3 R_3 T_4}, \quad (21)$$

$$V_3 = C_3 M_3, \quad (22)$$

$$V_4 = C_4 M_4. \quad (23)$$

Температура и давление на выходе из диффузора рассчитываются следующим образом:

$$T_5 = \frac{1 + \frac{\gamma_3 - 1}{2} M_4^2}{1 + \frac{\gamma_3 - 1}{2} M_5^2}, \quad (24)$$

$$P_5 = \frac{1 + \gamma_3 M_4^2}{1 + \gamma_3 M_5^2} P_4. \quad (25)$$

Для того, чтобы определить выходное давление из эжектора, могут использоваться следующие соотношения:

$$\frac{A_1}{A_d} = \frac{P_6}{P_1} \left(\frac{1}{(1+w)(1+w\frac{T_2}{T_1})} \right)^{1/2} \cdot \frac{\left(\frac{P_2}{P_6}\right)^{\frac{1}{\gamma_1}} \left(1 - \left(\frac{P_2}{P_6}\right)^{\frac{\gamma_1 - 1}{\gamma_1}}\right)^{1/2}}{\left(\frac{2}{\gamma_1 + 1}\right)^{\frac{1}{\gamma_3 - 1}} \left(1 - \frac{2}{\gamma_3 + 1}\right)^{1/2}}, \quad (26)$$

$$P_6 = P_5 \left(\eta_d \frac{\gamma_3 - 1}{2} M_5^2 + 1 \right)^{\frac{\gamma_3}{\gamma_3 - 1}}. \quad (27)$$

Таким образом, выходной поток из эжектора:

$$m_6 = m_l + m_v. \quad (28)$$

Уравнения (1)-(28) позволяют выполнить расчет эжектора на заданную производительность. Задачи подобного рода эффективно решаются при использовании различных моделирующих прикладных программ. В частности, применение универсальной моделирующей программы (УМП) ChemCad позволяет рассчитать теплофизические свойства воздушных потоков с летучими компонентами различных лакокрасочных материалов. В [9-11] рассмотрены примеры решения прикладных задач с помощью УМП ChemCad.

Уравнения (1)-(28) были записаны в алгоритм расчета эжектора для различных режимов работы (с использованием инструментария Data Map). Блок-схема расчета эжектора представлена на рис. 2.

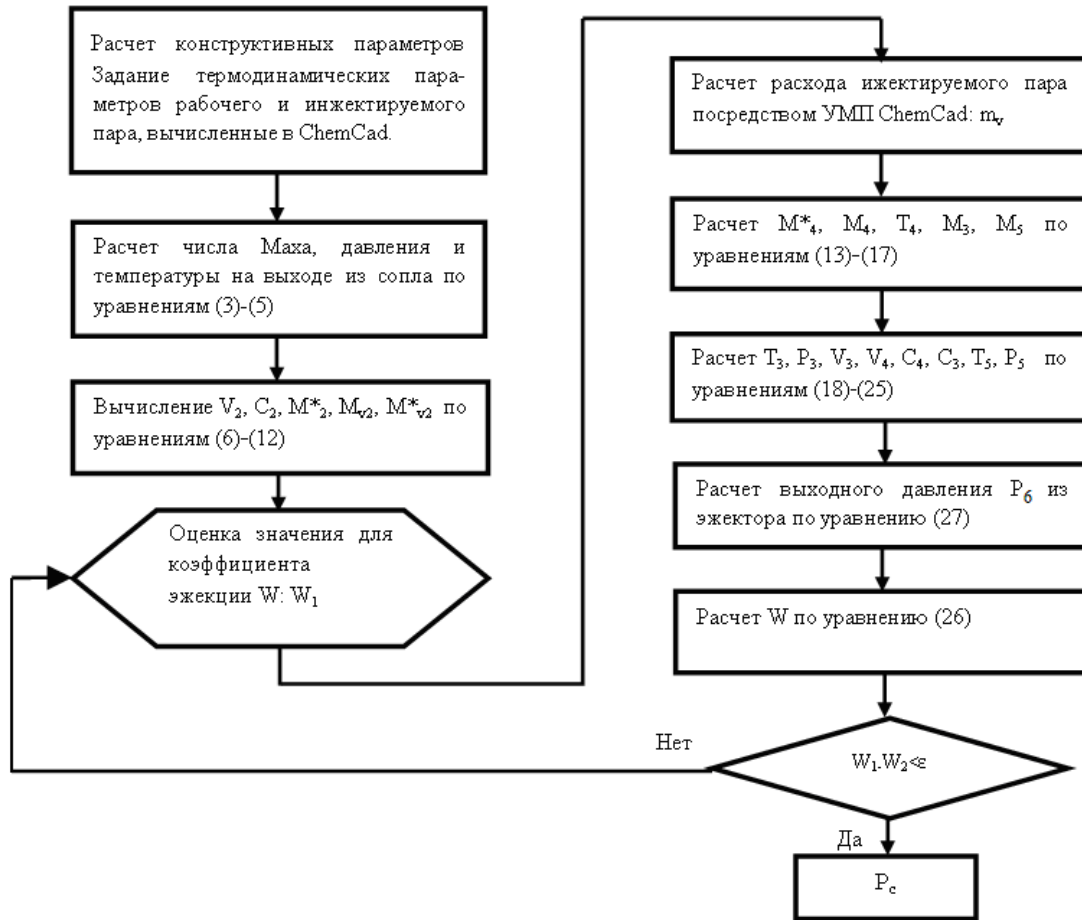


Рис. 2. Блок-схема алгоритма расчета эжектора по уравнениям (1)-(28)

На рис. 3 представлена расчетная схема эжектора в УМП ChemCad. Квадратные контуры обозначают следующие потоки: 1 – пассивный поток (ПП); 2 – газ на всасывающем патрубке эжектора; 3 – смесь АП и ПП; 4 – газ на выходе из эжектора; 5, 6 – активный поток (АП). Круглыми контурами обозначены модули расчетной схемы, имитирующие эжектор и вентилятор, где модуль 3 (Mixer) – смеситель, который смешивает входные потоки при заданном давлении на выходе; модуль 1 (Pump) – вентилятор; модуль 2 (Valve) – моделирует падение давления на всасывающей линии; модуль 4 (Valve) – моделирует повышение давления в выходном конусе эжектора.

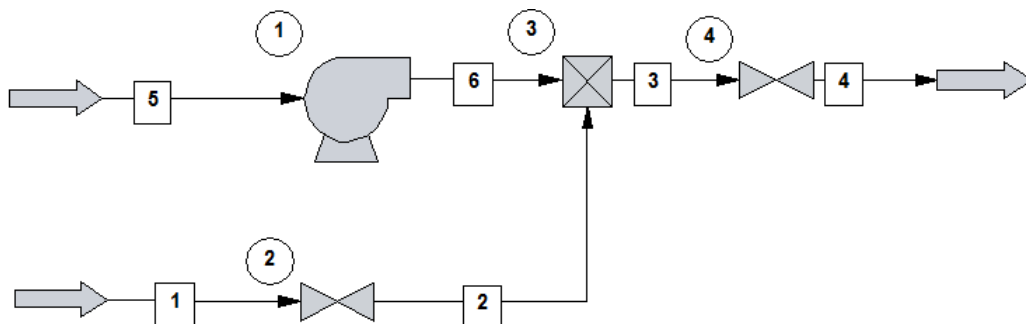


Рис. 3. Расчетная схема эжектора в УМП ChemCad

В таблице приведены рассчитанные геометрические размеры и параметры эжектора на производительность 6000 м³/с, который может быть рекомендован для вентиляции окрасочной камеры размером 5,4×3,4×2,5 м.

Таблица

Параметры эжектора

Параметр эжектора	Геометрический размер, мм
Диаметр выходного сечения сопла, d_1	211
Диаметр начала смесительной камеры, d_2	470
Диаметр горловины эжектора, d_3	376
Диаметр устья диффузора, d_4	800
Диаметр всасывания, $d_{вс}$	560
Диаметр напорного трубопровода, d_n	500
Длина смесительной камеры, $L_{кам}$	1320
Длина диффузора, $L_{диф}$	4240
Высота цилиндрической части сопла, Г	106
Высота конфузора сопла, Е	422
Расстояние от центра напорного воздуховода до низа приемной камеры, З	500
Высота приемной камеры, К	1000
Диаметр приемной камеры, $d_{пр}$	1000
Длина диффузора приемной камеры, М	560
Длина конфузора приемной камеры, И	528

К эжектору предлагается установить вентилятор марки ВЦ5-35-8В1.01, электродвигатель АИМ132М4 и потребляемой мощностью 11 кВт. Частота вращения 1500 об/мин, развиваемое полное давление 2900-2060 Па.

Заключение. Поскольку все лакокрасочные покрытия – легкогорючие вещества, то при проектировании вентиляции окрасочных камер (как новых, так и подлежащих реконструкции) желательнее использовать эжекционную вытяжную систему вентиляции. Используя инструментарий Data Map (встраиваемая функция), который связывает тело универсальной моделирующей программы УМП ChemCad с пользовательским файлом, можно интегрировать теплофизические свойства потоков в формулы (1)-(28), тем самым автоматизировав процесс расчета.

Полученные результаты могут быть рекомендованы к расчету при проектировании системы вентиляции окрасочных камер методом эжекции.

Список обозначений

P – давление, кПа;

T – температура, °К;

A – площадь сечения, м²;

γ – показатель адиабаты;

C – скорость звука, м/с;

V – фактическая скорость, м/с;

M – критерий Маха;

R – универсальная газовая постоянная, кДж/(кг °К);

w – коэффициент эжекции;

η – КПД;

m – массовый расход, кг/с.

Индексы

v – параметры пассивного потока;

1 – параметры активного потока;

2 – параметры на срезе сопла;

3 – параметры смешанного потока;

4 – параметры перед входом в диффузор;

5 – параметры на выходе из диффузора;

6 – параметры на выходе из эжектора;

c – параметры, относящиеся к соплу;

d – параметры, относящиеся к диффузору; * – критические параметры.

Список библиографических ссылок

1. Кирнова М. А., Сотникова О. А. Условия работы естественной вытяжной вентиляции в многоэтажных жилых домах // Научный вестник Воронежского ГАСУ. Строительство и архитектура. 2013. № 4 (32). С. 34–40.
2. Naoto Shinomiya., Satoru Takada., Tomoaki Ushio. Study on ventilation in high-rise building based on pressure differences measured at elevator doors // Energy Procedia. 2015. V. 78. P. 2712–2716.
3. Wahyu Sujatmiko, Hermawan K., Dipojono F. X., Nugroho Soelami, Soegijanto. Natural ventilation and temperature conditions in some high-rise building flats in Bandung and Jakarta in perspective of adaptive thermal comfort // Procedia Environmental Sciences. 2015. V. 28. P. 360–369.
4. Ali Shafiei Fini, Ali Moosavi. Effects of «wall angularity of atrium» on «buildings natural ventilation and thermal performance» and CFD model // Energy and Buildings. 2016. V. 121. P. 265–283.
5. Шонина Н. А. Вентиляция для многоэтажных жилых зданий // АВОК. 2013. № 6. С. 22–38.
6. Модульная вытяжная система вентиляции высотных и промышленных зданий : пат. 113818 Рос. Федерация. № 2011142710/12 ; заявл. 21.10.2011 ; опубл. 27.02.2012, Бюл. № 6. 14 с.
7. Осипов Э. В., Осипова Л. Э. Расчет эжекционной системы аспирации воздуха с помощью универсальной моделирующей программы CHEM CAD // Вестник Казанского технологического университета. 2014. № 9 (17). С. 221–223.
8. Современная техника и технологии // TECHNOLOGY.SNAUKA.RU. 2012. № 5. URL: <http://technology.snauka.ru/2012/05/832> (дата обращения: 02.01.2017).
9. Осипов Э. В., Теляков Э. Ш., Поникаров С. И. Системное моделирование установок вакуумной ректификации // Бутлеровские сообщения. 2011. Т. 28. № 20. С. 81–88.
10. Осипов Э. В., Теляков Э. Ш., Шоипов Х. С. Технологическое обследование вакуумной ректификационной колонны разделения мазута К-3 ТПП «Когалымнефтегаз» (ОАО «Лукойл – Западная Сибирь») // Вестник Казанского технологического университета. № 21. Федер. агенство по образованию, Казан. гос. технол. ун-т. Казань : КГТУ, 2013. С. 283–286.
11. Сайрутдинов Ф. М., Теляков Э. Ш., Садыков К. С. Влияние наличия в откачиваемых смесях легких углеводородов на производительность жидкостно-кольцевого вакуумного насоса (ЖКВН) // Вестник Казанского технологического университета. 2013. № 13. С. 158–163.

Osipova L.E. – candidate of technical sciences, associate professor

E-mail: osipovalilija@mail.ru

Kazan State University of Architecture and Engineering

The organization address: 420043, Russia, Kazan, Zelenaya st., 1

Osipov E.V. – candidate of technical sciences, associate professor

E-mail: eduardvosipov@gmail.com

Kazan National Research Technological University

The organization address: 420015, Russia, Kazan, Karl Marx st., 68

To the calculation of the exhaust ejection ventilation system of a paint booth**Abstract**

Problem statement At design of systems of ventilation of painting offices of industrial buildings special attention is paid to safety issues as all paint and varnish coverings – corrosion and active and easily combustible substances. In addition, solvent vapors are explosive. So for local cooling of painting cameras rationally to use safe ejector systems. They have well proved not only in high-rise residential and office buildings, today they find broad application and at ventilation of production rooms. The ejector is simple on a design, can work in the wide range of change of parameters of a condition of air streams.

Results. Calculation is carried out and the ejector of low pressure for the standard painting camera is designed. The model of ejector system of cooling with use of the universal simulating packet of ChemCad which contains very developed database for the decision of different application-oriented tasks is synthesized.

Conclusions. The obtained results can be recommended in the design of the ventilation system of paint booths both new and reconstructed. Using the software allows to carry out multiple calculations, which are indispensable for the solution of optimization problems.

Keywords: paint booth, sustainable design, industrial ventilation, ejection system.

References

1. Kirnova M. A., Sotnikova O. A. Working conditions of natural exhaust ventilation in high-rise buildings // Nauchnyj vestnik Voronezhskogo GASU. Stroitelstvo i arhitektura. 2013. № 4 (32). P. 34–40.
2. Naoto Shinomiya., Satoru Takada., Tomoaki Ushio. Study on ventilation in high-rise building based on pressure differences measured at elevator doors // Energy Procedia. 2015. V. 78. P. 2712–2716.
3. Wahyu Sujatmiko, Hermawan K., Dipojono F. X., Nugroho Soelami, Soegijanto. Natural ventilation and temperature conditions in some high-rise building flats in Bandung and Jakarta in perspective of adaptive thermal comfort // Procedia Environmental Sciences. 2015. V. 28. P. 360–369.
4. Ali Shafiei Fini, Ali Moosavi. Effects of «wall angularity of atrium» on «buildings natural ventilation and thermal performance» and CFD model // Energy and Buildings. 2016. V. 121. P. 265–283.
5. Shonina N. A. Ventilation for high-rise residential buildings // AVOK. 2013. № 6. P. 22–38.
6. Modular exhaust ventilation system of high-rise and industrial buildings: patent 113818 of the Rus. Federation. № 2011142710/12 ; decl. 21.10.2011; publ. 27.02.2012. Bull. In № 6. 14 p.
7. Osipov E. V., Osipova L. E. Calculation of the ejection system of air aspiration using the universal modeling program CHEM CAD // Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta. 2014. № 9 (17). P. 221–223.
8. Modern equipment and technology // TECHNOLOGY.SNAUKA.RU. 2012. № 5. URL: <http://technology.snauka.ru/2012/05/832> (reference date: 02.01.2017).
9. Osipov E. V., Telyakov E. Sh., Ponikarov S. I. System modeling of vacuum rectification installations // Butlerovskie soobshcheniya. 2011. T. 28. № 20. P. 81–88.
10. Osipov E. V., Telyakov E. Sh., Shoipov Kh. S. Technological inspection of the vacuum rectification tower for separation of fuel oil K-Z TPP «Kogalymneftegaz» (JSC LUKOIL – West Siberia) // Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta. № 21. Feder. agentstvo po obrazovaniyu, Kazan. gos. tekhnol. un-t. Kazan: KGTU, 2013. P. 283–286.
11. Sayrutdinov F. M., Telyakov E. Sh., Sadykov K. S. The impact of the presence in the pumped mixtures of light hydrocarbons on the performance of liquid ring vacuum pump (LRVP) // Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta. 2013. № 13. P. 158–163.