

## Оригинальная статья / Original article

УДК 004.942

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2025-29-2-37-54>

## Моделирование газовых потоков для оценки эффективности улавливания испарений от промышленных ванн

Н.А. Марков <sup>1</sup> ✉, С.В. Угорова <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Владимирский государственный университет им. А. Г. и Н. Г. Столетовых,  
ул. Горького, д. 87, г. Владимир 600000, Российская Федерация

✉ e-mail: mnikita.markovm@gmail.com

### Резюме

**Цель исследования.** Оценка эффективности и оптимизация работы разработанного местного вентиляционного устройства с использованием современных методов моделирования текучих сред.

**Методы.** В работе рассмотрены методы моделирования сложной технической системы – промышленной ванны, с отдельными функциональными узлами для улавливания вредных испаряющихся веществ и их прижатия к поверхности раствора – двухбортowego отсоса и системы наддува соответственно. Для каждой подсистемы, которые не могут быть описаны единым математическим аппаратом, применялись методы комплексного потенциала потоков газа и компьютерного моделирования с последующим сравнением и поиском оптимальных результатов.

**Результаты.** Найдена максимальная высота улавливания вредных веществ над поверхностью раствора ванны, условие для которой учитывает отношение количества воздуха, испаряемого от раствора ванны, и общее количество воздуха, удаляемого бортовым отсосом. Для построенной модели вытяжного устройства от ванны для проведения технологических операций с металлами по разработанной полезной модели было проведено исследование движения воздушных потоков и проанализирована эффективность разработанного вытяжного бортового отсоса с помощью компьютерного моделирования.

**Заключение.** Исследование показало, что эффективность сложной системы местной вытяжной вентиляции с наддувом, определяемой распространением вредных веществ в рабочей зоне, возможно оценить и улучшить, используя методы моделирования, которые позволяют изменить конструкцию бортовых отсосов, рассчитать и подобрать параметры элементов, установить и проанализировать принцип работы модели устройства в целом, влияющий на эффективность удаления вредных веществ.

**Ключевые слова:** улавливание вредных веществ; двухбортowe отсосы с наддувом; местная вентиляция; математическое моделирование; компьютерное моделирование; промышленные ванны.

**Конфликт интересов:** Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

**Финансирование:** Работа выполнена в рамках государственного задания в сфере научной деятельности Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема FZUN-2024-0004, госзадание ВлГУ).

**Для цитирования:** Марков Н.А., Угорова С.В. Моделирование газовых потоков для оценки эффективности улавливания испарений от промышленных ванн. 2025; 29(2): 37-54. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2025-29-2-37-54>.

Поступила в редакцию 29.04.2025

Подписана в печать 05.06.2025

Опубликована 23.07.2025

© Марков Н.А., Угорова С.В., 2025

## Modeling gas flows to assess the efficiency of vapor capture from industrial tanks

Nikita A. Markov <sup>1</sup>✉, Svetlana V. Ugorova <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Vladimir State University named after A.G. and N.G. Stoletovs  
87, Gor'kogo str., Vladimir 600000, Russian Federation

✉ e-mail: mnikita.markovm@gmail.com

### Abstract

**Purpose of research.** Evaluation of the effectiveness and optimization of the developed local ventilation device using modern fluid modeling methods.

**Methods.** The study considers methods for modeling a complex technical system – an industrial bath, with separate functional units for trapping harmful evaporating substances and pressing them to the surface of the solution – a double-side suction and a boost system, respectively. For each subsystem, which cannot be described by a single mathematical apparatus, methods of complex potential of gas flows and computer modeling were used, followed by comparison and search for optimal results.

**Results.** The maximum height of trapping harmful substances above the surface of the bath solution is found, the condition for which takes into account the ratio of the amount of air evaporated from the bath solution and the total amount of air removed by the on-board suction. For the constructed model of an exhaust device from a bath for carrying out technological operations with metals, according to the developed utility model, a study of the movement of air flows was conducted and the effectiveness of the developed exhaust on-board suction was analyzed using computer modeling.

**Conclusion.** The study showed that the effectiveness of a complex supercharged local exhaust ventilation system, determined by the spread of harmful substances in the work area, can be assessed and improved using modeling methods that allow you to change the design of on-board suction systems, calculate and select the parameters of the elements, establish and analyze the principle of operation of the device model as a whole, affecting the effectiveness of removal of harmful substances.

**Keywords:** harmful substance capture; pressurized double-sided slot exhausts; local exhaust ventilation; mathematical modeling; computational modeling; industrial tanks.

**Conflict of interest.** The Authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

**Funding.** The research was carried out within the state assignment in the field of scientific activity of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (theme FZUN-2024-0004, state assignment of the VISU).

**For citation:** Markov N. A., Ugorova S. V. Modeling gas flows to assess the efficiency of vapor capture from industrial tanks // *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2025; 29(2): 37-54 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2025-29-2-37-54>.

Received 29.04.2025

Accepted 05.06.2025

Published 23.07.2025

\*\*\*

### Введение

В настоящее время бортовые отсосы являются важным элементом систем вен-

тиляции и очистки воздуха на предприятиях и широко применяются в различных отраслях промышленности и проведении лабораторных и иных экспериментов.

Они предназначены для удаления вредных веществ, пыли, дыма, аэрозолей, металлической стружки при металлообработке и других загрязнений из рабочей зоны, обеспечивая тем самым безопасные и комфортные условия труда для персонала<sup>1</sup> [1].

Бортовые отсосы относятся к вытяжным устройствам технологических и аспирационных газов и могут быть различных типов и конструкций, в зависимости от конкретных условий их применения [2, 3, 4, 5, 6, 7]. Такие устройства весьма разнообразны и в основном зависят от технологии процесса, доступа к агрегатам, например, ваннам для травления металла, и степени их автоматизации<sup>2</sup> [8, 9, 10].

Расположение воздухоприемной щели и тип бортового отсоса зависит от технологического процесса, площади улавливания вредных веществ, степени их улавливания. В некоторых случаях для более эффективного улавливания вредных испарений и снижения расхода удаляемого воздуха вытяжным отсосом предусматривают «передувку» воздуха, которая представляет собой настилающийся

сверху воздушный поток, который прижимает вредные выделения или испарений при технологических процессах. Для гальванических и травильных ванн применяются специальные опрокинутые одно- и двухбортовые отсосы без и с передувкой воздуха.

Исследование направлено на оценку эффективности и оптимизацию работы разработанного местного вентиляционного устройства с использованием современных методов моделирования текучих сред. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- определить основные параметры и характеристики промышленной ванны, вытяжного устройства;
- построить модель, используя технический результат разработанной конструкции, для проведения математического расчета;
- определить основные параметры текучей среды рассчитанных с помощью моделирования;
- оценить и проанализировать эффективность работы устройства с заданными параметрами модели и сравнить их с расчетными;
- определить параметры конструкции устройства до получения требуемых значений и эффективности работы полезной модели.

## Материалы и методы

Для проведения компьютерного моделирования использовался программный комплекс SolidWorks (SW) с разделом вычисления текучих сред FlowSim-

<sup>1</sup> Расчет бортовых отсосов из технологических ванн травления металлов и сплавов: метод. указания к практическим и лаб. занятиям для студентов спец. 1103, 1105, 1203, 1208 всех форм образования. Ч.3 / В.А. Ульянов [и др.]. Нижний Новгород, 2007. 12 с.

<sup>2</sup> Патент № 135087 Российская Федерация, МПК F24F 7/06 (2006.01). Устройство для удаления вредных выделений / Угорова С. В., Садов В. С., Наумова Л.А., Боровицкий А.А. № 2013125816/12: заявлено 04.06.2013: опубликовано 27.11.2013. Бюл. № 33 8 с.

ulation (FS) (серийный номер: 9710 0250 0354 3538 JGWC T8H8, сетевая лицензия: 25735), основанное на методе конечных объемов.

Внесение изменений в конструкцию устройства бортового отсоса для оптимизации его работы осуществлялось с помощью сравнения показателей текучей среды и анализа полученных результатов процесса моделирования.

Теоретический расчет параметров конструкции устройства для удаления паров при использовании технологических ванн проводился по методике расчета местных вытяжных бортовых отсосов [11, 12, 13].

Для построения модели бортового отсоса необходимы такие параметры конструкции, как размеры промышленной ванны, длина, диаметр и количество насадков для передувки, показатели скорости всасывания на входе в устройство и объемный расход передувки и удаляемого воздуха.

Задаются предварительные рекомендуемые значения, необходимые для определения этих параметров [14]: расстояние щелевого насадка от ванны принимается 1,5 м; ширина (высота) щели отсоса по конструктивным и технологическим соображениям принимается не менее 50 мм; размеры промышленной ванны – 2100x1000 мм; расстояние от раствора до кромки ванны при опрокинутом бортовом отсосе – 150 мм; диаметр насадка принимается 50 мм.

Длина насадка  $H$  определяется по следующей формуле:

$$H = d_x / 4 = 0,19 \text{ м}, \quad (1)$$

где  $d_x$  – диаметр струи на расстоянии  $x = B = 1,5$  м, определяется по формуле

$$d_x = d_0 \left( 6,8 \frac{ax}{d_0} + 1 \right) = 0,764 \text{ м}, \quad (2)$$

где  $a = 0,07$  – коэффициент турбулентности для круглого отверстия;

$d_0 = 0,05$  м – диаметр насадка.

Количество отверстий  $n$  для выхода воздуха определяется по формуле

$$n = x / d_x = 2,87 \text{ шт.} \quad (3)$$

Количество подаваемого воздуха  $L_0$  определяется по следующей формуле:

$$L_0 = \frac{430F(\Delta t^{0,25} H)^{\frac{1}{3}}}{4,36 \left( \frac{ax}{d_0} + 0,145 \right) - n} = 161,5 \text{ м}^3/\text{ч.} \quad (4)$$

Скорость воздуха на выходе из насадка  $v_0$  определяется по формуле

$$v_0 = \frac{4L_0}{\pi d_0^2} = 22,86 \text{ м/с.} \quad (5)$$

Количество воздуха  $L_x$ , удаляемого отсосом:

$$L_x = 4,36 \cdot 0,0307 \left( \frac{ax}{d_0} + 0,145 \right) = 1581,2 \text{ м}^3 / \text{ч.} \quad (6)$$

Скорость воздуха, удаляемого отсосом  $v_x$ :

$$v_x = \frac{4L_x}{\pi d_x^2} = 0,96 \text{ м/с.} \quad (7)$$

Также были рассчитаны параметры конструкции перфорированного воздухораспределителя для подачи *низкоскоростного настилающегося* потока воздуха исходя из условия их равномерного распределения: диаметр отверстий

перфорации 6 мм, их количество 180 шт. и расстояние между ними 20 мм.

Для построения компьютерной модели (рис. 1,а) была использована разработанная полезная модель (рис. 1,б), принцип работы которого описан в Патенте № 135087<sup>1</sup> [15], отличием от типовых конструкций двухбортного отсоса с передувкой которой является дополнительный воздуховод для наддува воздуха, установленный на заданном расстоянии, перфорированный воздухо-рас-пределитель и щелевые воздухо-распределители.

Используя параметры теоретического расчета, построена компьютерная модель промышленной ванны и конструкции бортового отсоса.

Для проведения расчета и задания параметров текучей среды конструкция у ванны была дополнена вытяжными воздуховодами от бортов (рис. 2,а), имеющих наклонную сходящуюся поверхность (рис. 2,б).

Подаваемый воздух для передувки предусмотрен от приточного отверстия диаметром 100 мм, распределенного с помощью трех воздуховодов (рис. 3,а), сходящихся в крестовине, на двух крайних (диаметр 100 мм) установлены щелевые отверстия, создающие воздушную завесу, препятствующую попаданию вредных веществ в рабочую зону персонала, а на

центральной (диаметр 80 мм) установлен перфорированный воздухораспределитель (рис. 3,б).

Математическое моделирование технологического процесса при использовании промышленных ванн проводилось по математическому аппарату [16, 17].

Максимальное расстояние испаренных вредных веществ от поверхности раствора (рис. 4) находится в точке с координатами  $(x_0; y_0)$ , слагаемыми которого является расстояние  $H$  и  $\Delta H$  (высота улавливания).

Траектория движения испаренных вредных веществ состоит из потока аэрозоля с расходом  $V_n$  (вдоль оси  $y$ ), и общего расхода воздуха, удаляемого бортовым отсосом  $V_0$  (вдоль оси  $x$ ).

Для предотвращения попадания вредных веществ в рабочую зону персонала из ванны необходимо, чтобы выполнялось условие  $V_0 / V_n > 1$ .

Для определения  $V_0 / V_n$  используем комплексным потенциалом рассматриваемых потоков. В вертикальном направлении комплексный потенциал по координате  $z = x + iy$ , где  $i = \sqrt{-1}$  равен:

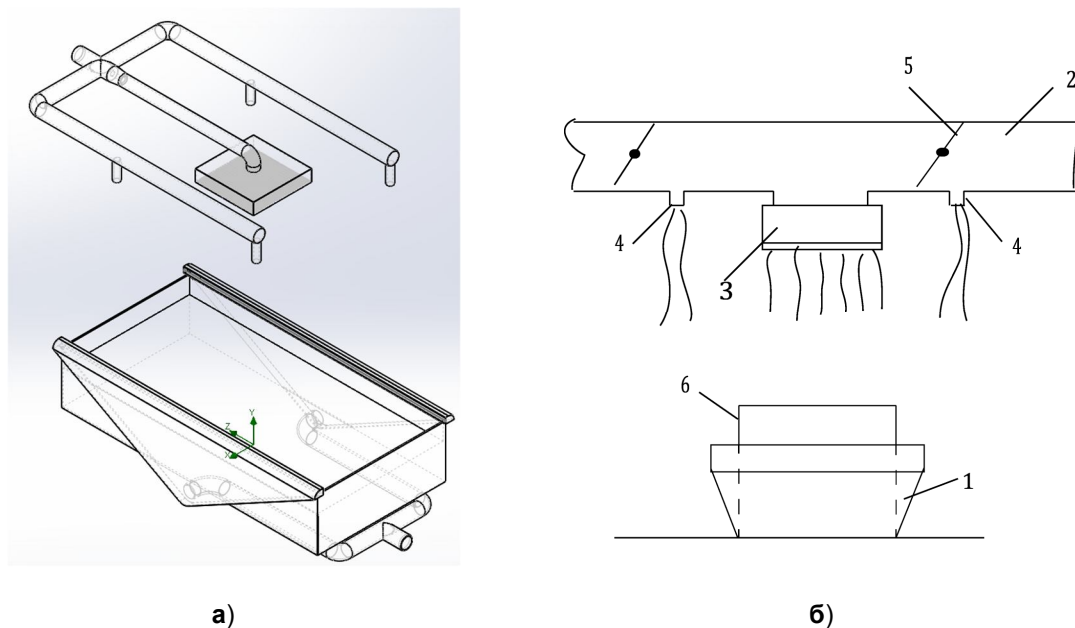
$$\omega_1 = -i \frac{V_n}{b} z. \quad (8)$$

По отношению к щели борта горизонтальный поток образуется двумя симметричными плоскими струями, имеющими комплексные потенциалы:

$$\omega_2 = \frac{V_0}{2\pi} \ln \left[ \sin \frac{\pi}{b} (z - iH) \right], \quad (9)$$

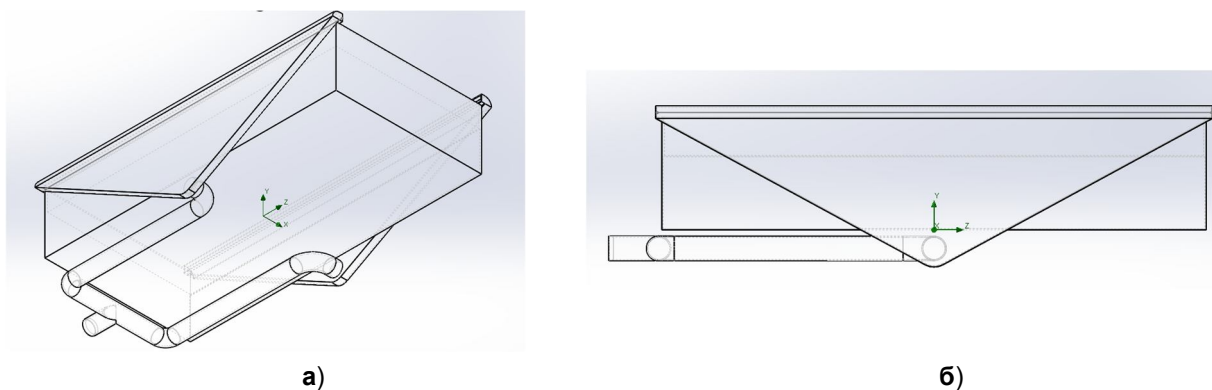
$$\omega_3 = \frac{V_0}{2\pi} \ln \left[ \sin \frac{\pi}{b} (z + iH) \right]. \quad (10)$$

<sup>1</sup> Патент № 135087 Российская Федерация, МПК F24F 7/06 (2006.01). Устройство для удаления вредных выделений / Угорова С. В., Садов В. С., Наумова Л.А., Боровицкий А.А. № 2013125816/12: заявлено 04.06.2013: опубликовано 27.11.2013. Бюл. № 33 8 с.



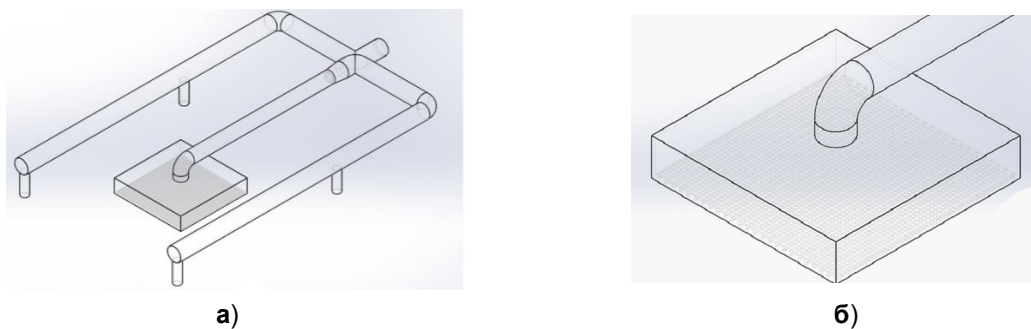
**Рис. 1.** Построенная в SW (а) и полезная (б) модель: 1 – двухбортовой местный отсос; 2 – воздуховод; 3 – перфорированный воздухораспределитель; 4 – щелевые воздухораспределители; 5 – воздушная заслонка; 6 – промышленная ванна

**Fig. 1.** The model built in SW (a) and utility model (б): 1 – two-side local suction; 2 – air duct, 3 – perforated air distributor; 4 – slit air distributors; 5 – air damper; 6 – industrial bath



**Рис. 2.** Конструкция бортового отсоса у ванны

**Fig. 2.** The design of the on-board suction at the tub



**Рис. 3.** Элементы системы вентиляции, подающей приточный воздух на передувку

**Fig. 3.** Elements of the ventilation system supplying supply air to the purge

В данном случае частицы аэрозоля поднимаются над зеркалом ванны и, при допущении об одинаковости условий течения у каждого из бортов, разделяются на два симметричных потока. Следовательно, комплексный потенциал течения газа принимается потенциальным, а рациональное удаление аэрозоля обеспечивается при  $V_0 / V_n > 1$ .

Комплексный потенциал  $\omega$  такого течения:

$$\begin{aligned}\omega &= \omega_1 + \omega_2 + \omega_3 = \\ &= -i \frac{V_n}{b} z - \frac{V_0}{2\pi} \ln \left[ \sin \frac{\pi}{b} (z - iH) \right] + \\ &+ \frac{V_0}{2\pi} \ln \left[ \sin \frac{\pi}{b} (z + iH) \right].\end{aligned}\quad (11)$$

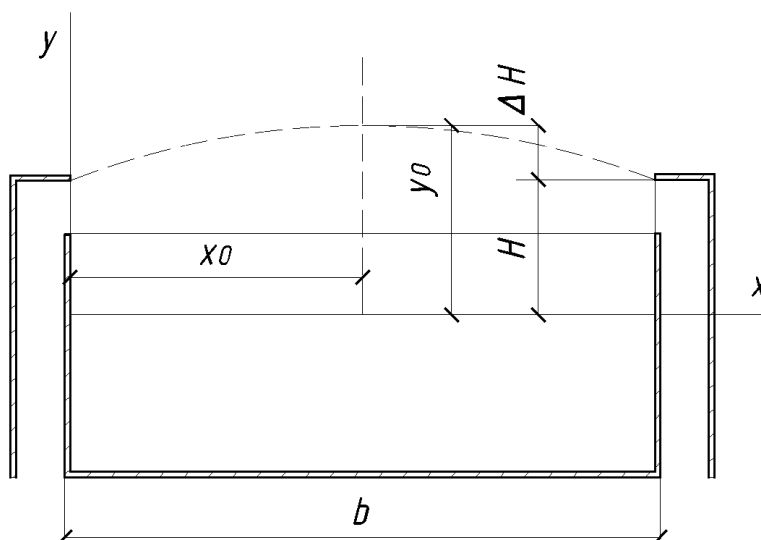


Рис. 4. Расчетная схема двухбортного отсоса

Fig. 4. Calculation scheme of the double-side suction

Первая производная по координате:

$$\frac{\partial \omega}{\partial z} = -i \frac{V_n}{b} - \frac{V_0}{b} \left[ \cot \frac{\pi}{b} (z - iH) + \cot \frac{\pi}{b} (z + iH) \right]. \quad (12)$$

Тогда комплексная скорость газа:

$$\begin{aligned}v_x + iv_y &= -i \frac{V_n}{b} - \frac{V_0}{2b} \frac{\sin \left[ \frac{2\pi}{b} z \right]}{\sin \left[ (z - iH) \frac{\pi}{b} \right] \sin \left[ (z + iH) \frac{\pi}{b} \right]} = -i \frac{V_n}{b} - \frac{V_0}{2b} \frac{\begin{aligned} &+ \sin \left( \frac{2\pi}{b} x \right) \cosh \left( \frac{2\pi}{b} y \right) + \\ &+ i \cos \left( \frac{2\pi}{b} x \right) \sinh \left( \frac{2\pi}{b} y \right) \end{aligned}}{\cosh \left( \frac{2\pi}{b} H \right) - \cos \left( \frac{2\pi}{b} x \right) \cosh \left( \frac{2\pi}{b} y \right) + \\ &+ i \sin \left( \frac{2\pi}{b} x \right) \sinh \left( \frac{2\pi}{b} y \right)}.\end{aligned}\quad (13)$$

Используя (13), вычислим проекцию скорости на ось ординат:

$$v_y = \frac{V_n}{b} + \frac{V_0}{2b} \frac{\cos\left(\frac{2\pi}{b}x\right)\sinh\left(\frac{2\pi}{b}y\right)\cosh\left(\frac{2\pi}{b}H\right) - \cos^2\left(\frac{2\pi}{b}x\right)\sinh\left(\frac{2\pi}{b}y\right)\cosh\left(\frac{2\pi}{b}y\right) + \sin^2\left(\frac{2\pi}{b}y\right)\sinh\left(\frac{2\pi}{b}y\right)\cosh\left(\frac{2\pi}{b}y\right)}{\left\{\cosh\left(\frac{2\pi}{b}H\right) - \cos\left(\frac{2\pi}{b}x\right)\cosh\left(\frac{2\pi}{b}y\right)\right\}^2 + \left\{\sin\left(\frac{2\pi}{b}x\right)\sinh\left(\frac{2\pi}{b}y\right)\right\}^2}. \quad (14)$$

В точке максимума линии тока, имеющей координаты  $x_0 = b/2$  и  $y_0 = H + \Delta H$ , проекция скорости на ось ординаты  $v_y = 0$ . Поэтому из выражения (14) можно записать:

$$V_0 - V_n = \frac{\left\{\sinh\left[2\pi\frac{(H+\Delta H)}{b}\right]\right\}}{\left\{\cosh\left[2\pi\frac{H}{b}\right] + \cosh\left[2\pi\frac{(H+\Delta H)}{b}\right]\right\}}. \quad (15)$$

Или для отношения расходов потоков:

$$\frac{V_0}{V_n} = \frac{\left\{\cosh\left[2\pi\frac{H}{b}\right] + \cosh\left[2\pi\frac{(H+\Delta H)}{b}\right]\right\}}{\left\{\sinh\left[2\pi\frac{(H+\Delta H)}{b}\right]\right\}}. \quad (16)$$

## Результаты и их обсуждение

При проведении математического моделирования с рекомендуемыми расстояниями раствора от кромки ванны 150 мм и ширины щели бортового отсоса не менее 50 мм, определена максимальная высота улавливания  $\Delta H$  и построен график (рис. 5) следующей функции:

$$f = \frac{\cosh\left[2\pi\left(x + \frac{1}{5}\right)\right] + \cosh\left[\frac{2\pi}{5}\right]}{\sinh\left[2\pi\left(x + \frac{1}{5}\right)\right]} > 1. \quad (17)$$

При условии отношения количества выделений к объему удаляемого воздуха через бортовой отсос больше единицы максимальная высота, при которой

бортовой отсос будет улавливать испарения из ванны, составляет 0,0383 м или 38,3 мм.

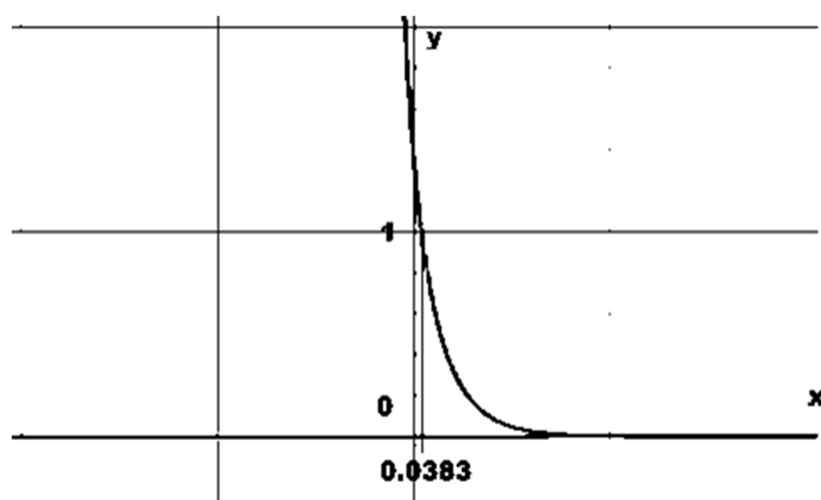
Для построенной модели (рис. 1,а) в разделе вычисления гидрогазодинамики FlowSimulation, используя значения количества подаваемого и удаляемого воздуха от устройства бортового отсоса, были заданы следующие граничные условия:

I рода – для параметров отсасываемого воздуха (объемный расход на выходе  $L = 1581,2 \text{ м}^3/\text{ч}$ ), для подачи воздуха на передувку (объемный расход на входе  $L = 161,5 \text{ м}^3/\text{ч}$  для параметров окружающего воздуха (температура  $T = 20^\circ\text{C}$ , давление  $P = 101330 \text{ Па}$ ); II рода – условие градиента бесконечности на границах расчетной области по давлению, температуре и скорости.

Установленное физическое время 60 секунд, количество разбитых ячеек по текучей среде 96 224, твердой среде – 23 819, итераций – 120.

При анализе результатов компьютерного моделирования в SWFS построенной конструкции с заданными размерами и параметрами симуляции было отмечено, что в центральном воздуховоде скорость движения подающего воздуха сравнительно выше, чем в крайних, что связано с необходимостью увязки потерь давления в них после разветвления потока.





**Рис. 5.** График функции относительно максимальной высоты улавливания  $\Delta H$

**Fig. 5.** Graph of the function relative to the maximum trapping height  $\Delta H$

Из этого следует, что весь скоростной поток воздуха через центральный воздуховод не успевает снизить скорость в перфорированном воздухораспределителе и продолжает движение вдоль оси движения, тем самым не только снижая эффективность передувки, но и принцип работы устройства в целом.

Для увязки потерь центрального и крайних воздуховодов было предусмотрено установка дросселирующего клапана (рис. 6), по принципу работы схожем с шибером в системах вентиляции, изменяемого свое положение в зависимости от разности потерь.

Для расчета диаметра отверстия дросселя по методике расчета [18] по формуле (18) был подобран диаметр внутреннего проходного сечения, равный 35 мм.

$$d = \frac{4\pi Q v^2}{\mu \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}}} = 0,035 \text{ м}, \quad (18)$$

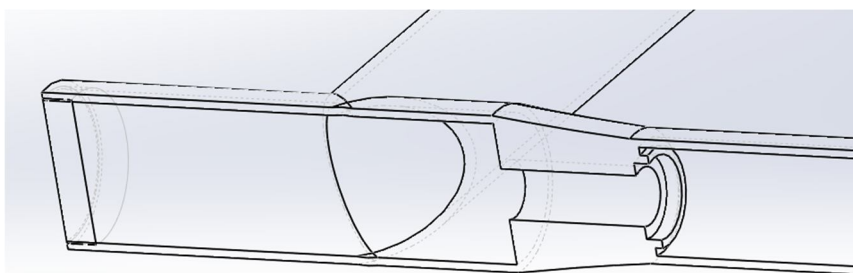
где  $Q$  – требуемый увязочный расход;

$v$  – скорость потока воздуха;

$\mu$  – коэффициент, учитывающий устройство и тип дросселя;

$\Delta P$  – разность потерь давления;

$\rho$  – плотность протекающей среды.



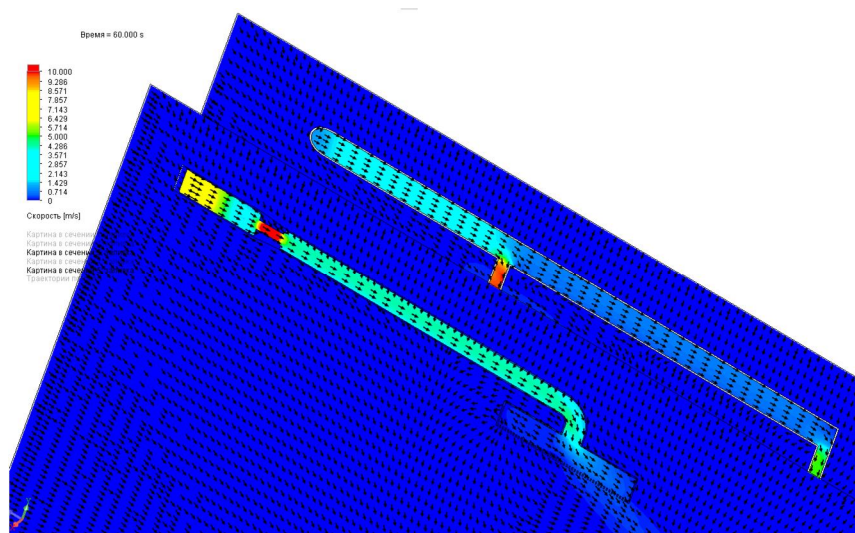
**Рис. 6.** Дроссельный клапан в сечении центрального воздуховода

**Fig. 6.** Throttle valve in the section of the central duct

После изменений конструкции вентиляции для подачи воздуха на переувку, был проведен вторичный расчет. При анализе полученных результатов, представленных на рис. 7, видно, что после установки дроссельного клапана местные потери давления в центральном воздуховоде увеличились, что поспособствовало увязке центрального и крайних воздухопроводов между собой для равномерного распределения скоростей и объемного расхода воздуха соответственно.

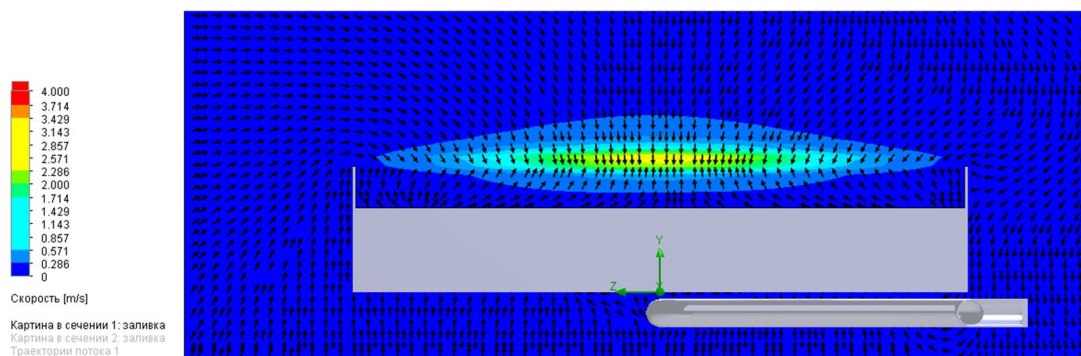
Средняя скорость движения воздуха в центральном воздуховоде составила 4,2 м/с, а в крайних – 3,6, что связано не только с установкой дросселя, но и заведомо уменьшенном диаметре центрального воздуховода, составляющий 80 мм.

После увязки воздухопроводов было проанализировано полученное распределение скоростей в продольном сечении на расстоянии 5 мм от отверстий бортового отсоса к центру ванны (рис. 8) и построен график по всей длине щели (рис. 9).



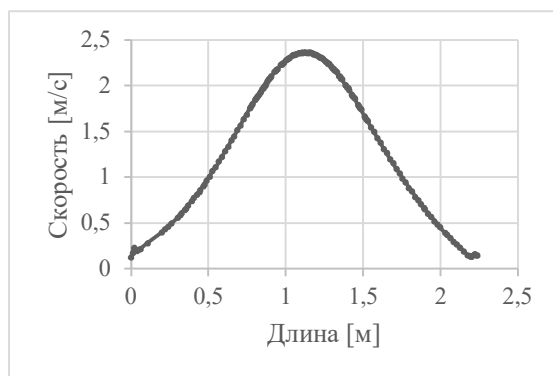
**Рис. 7.** Распределение скорости воздуха в сечении центрального и крайних воздухопроводов

**Fig. 7.** Distribution of air velocity in the section of the central and extreme ducts



**Рис. 8.** Распределение скорости воздуха в сечении всасывающих отверстий бортов

**Fig. 8.** Distribution of air velocity in the section of the suction ports of the sides



**Рис. 9.** График распределения скорости воздуха в центре всасывающих отверстий бортов

**Fig. 9.** Graph of the air velocity distribution in the center of the suction ports of the sides

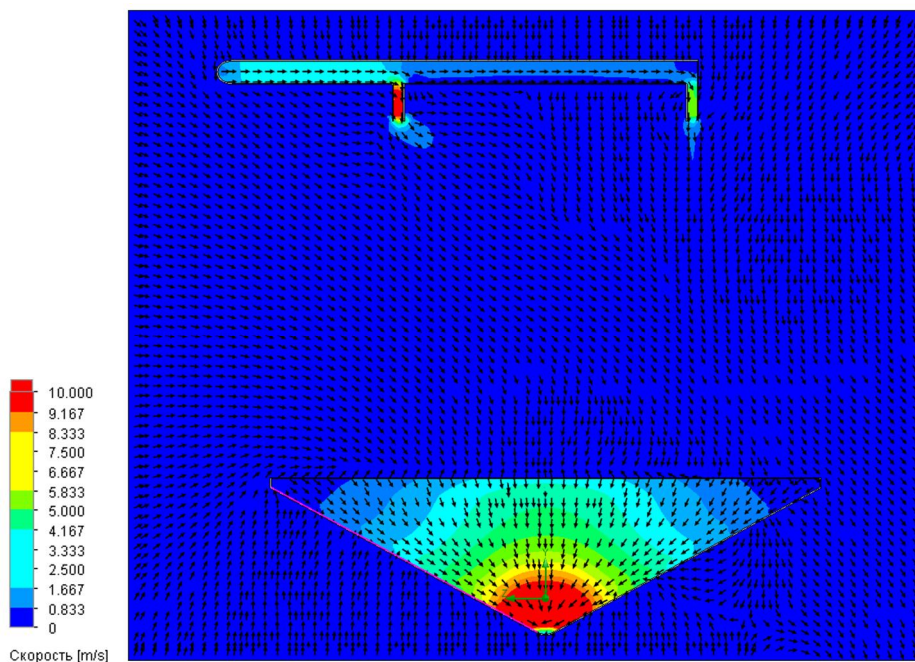
Распределение скорости на входе в отверстия у края ванны малы по сравнению со скоростью в центре (рис. 9), что связано с одним установленным отсасывающим воздуховодом бортового отсоса.

Для равномерности необходимо предусмотреть равномерно распределенный всасывающий воздуховод по всей длине, а также прямоугольный вид конструкции борта, либо компенсировать неравномер-

ность установкой дополнительных расщеков внутри его полости.

На рис. 10 представлена скорость движения воздуха в сечении крайнего воздуховода, где стоит отметить ее низкие значения в воздуховоде к дальнему насадку.

Так как часть расхода воздуха выходит из первой насадки, дальнейшее движение воздуха, а именно ее скорость, не компенсируется диаметром воздуховода.



**Рис. 10.** Распределение скорости воздуха в крайних воздуховодах

**Fig. 10.** Distribution of air velocity in the outermost ducts



Для этого рассчитаем диаметр воздуховода для сохранения скорости движения воздуха к дальнему насадку через формулу сохранения расхода:

$$Q_0 = \frac{Q_0}{2} + v_0 \frac{\pi d_2^2}{4}. \quad (19)$$

Отсюда получим, что диаметр воздуховода после первой насадки по движению воздуха должен быть равен 70,7 мм.

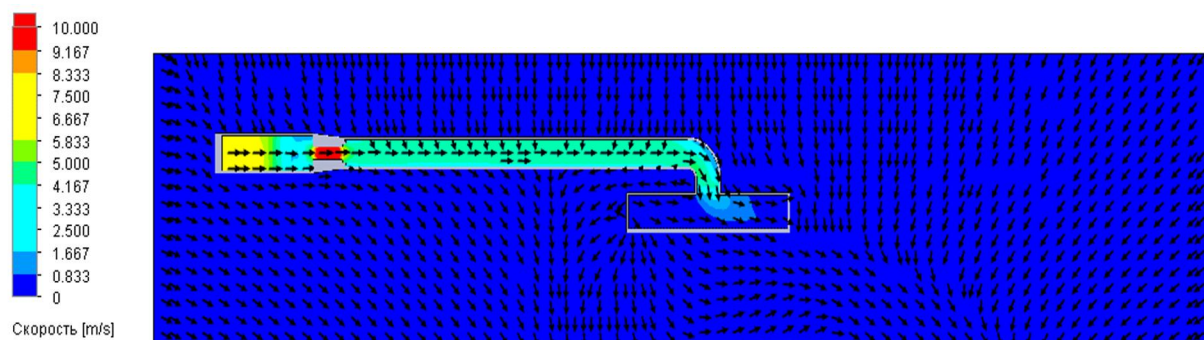


Рис. 11. Распределение скорости воздуха в центральном воздуховоде

Fig. 11. Distribution of air velocity in the central duct

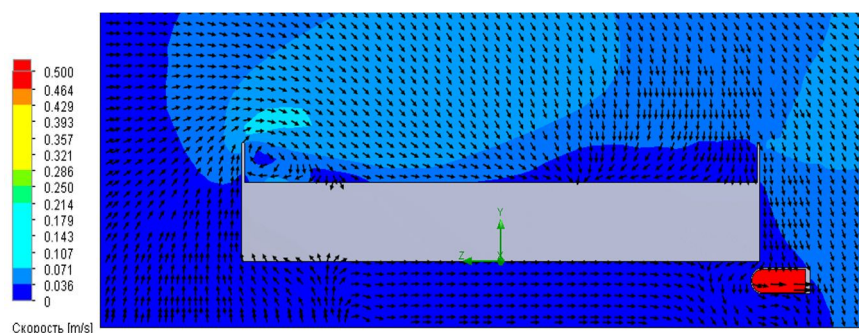


Рис. 12. Распределение скорости воздуха в продольном разрезе

Fig. 12. Distribution of air velocity in the longitudinal section

Однако рассматривая рис. 12 видно, что низкоскоростной поток струи *равномерно распределяется* по всей площади ванны, *прижимая* возможные испарения.

При этом график скорости вдоль оси Y (рис. 13) показывает, что у поверхности раствора ванны низкоскоростной поток воздуха сохраняет скорость и его скорость резко возрастает у щелевого всасывающего отверстия, что отмечено ранее.

При выборе диаметра воздуховода из номенклатурного ряда, стоит подобрать воздуховод диаметром 80 мм.

Увязка воздуховодов (рис. 11) многократно снизила выход воздуха из перфорированного воздуховода, но не изменила направление его движения, которое смещено по движению подающего воздуха.

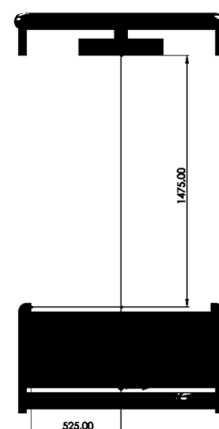
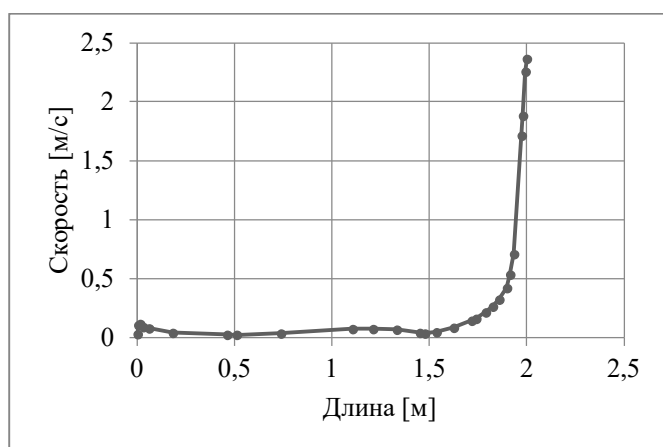
На выходе из насадок (рис. 14) скорость воздуха равна 6 м/с, что отличается от расчетной в связи с тем, что общий расход подаваемого воздуха распределяется на 5 воздухораспределителей (один с перфорацией и четыре насадки). Подставляя расход воздуха в расчетную формулу, получим, что скорость воздуха на выходе должна быть равна 4,57 м/с. Это связано с неравномерным рас-

пределением расходов в воздуховодах, что на практике невозможно устранить из-за ограниченности ряда диаметров.

Из рис. 15 можно сделать вывод о том, что вектора скоростей показывают настиление низкоскоростного потока воздуха из центрального воздухораспределителя, отсекаание воздуха помещения и

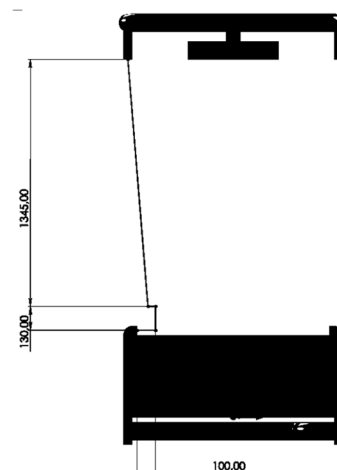
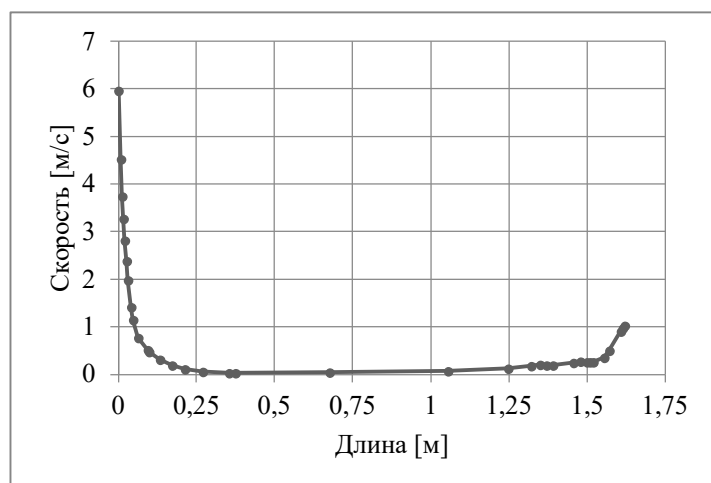
границ ванны, всасывание воздуха через бортовые отверстия устройства.

Анализируя результаты можно утверждать, что проведенное исследование посредством моделирования показывает возможность улучшения конструкции устройств для определения эффективности работы моделей.



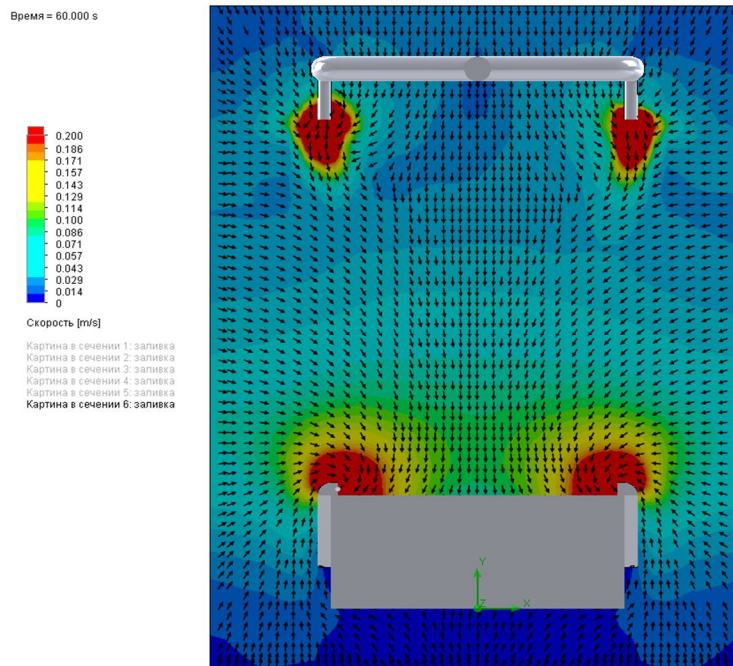
**Рис. 13.** График скорости по траектории «перфорированный воздухораспределитель-плоскость раствора» вдоль оси Y

**Fig. 13.** Velocity graph along the "perforated air distributor-mortar plane" trajectory along the Y axis



**Рис. 14.** График скорости воздушных потоков по траектории «насадка-поверхность раствора»

**Fig. 14.** Graph of air flow velocity along the "nozzle-solution surface" trajectory



**Рис. 15.** Распределение скорости в сечении насадок и бортового отсоса местной приточно-вытяжной системы вентиляции

**Fig. 15.** Speed distribution in the cross section of the nozzles and on-board suction of the local supply and exhaust ventilation system

## Выводы

По результатам проведения моделирования и изменений конструкции устройства можно сделать следующие выводы:

- необходимо предусмотреть вытяжные воздуховоды от симметрично расположенных бортов местного отсоса по длинной стороне технологической ванны;
- необходимо заранее предусмотреть вид и конструкцию бортов, так как при установленном одном отверстии в центральной части удаляемый поток воздуха будет неравномерно распределяться по длине отсасывающей щели;
- подбор диаметров подающих воздуховодов для увязки расхода воздуха, подаваемого на все виды воздухоораспределителей; в предложенной модели и с

данными диаметрами воздуховодов, их увязка осуществляется с помощью дроссельного клапана, установленного после разветвления (крестовины) на центральном воздуховоде, диаметр проходного отверстия которого 35 мм;

– максимальная высота улавливания вредных испарений вытяжным устройством в центре ванны над поверхностью раствора равно 38,3 мм;

– увязка воздуховодов влияет на принцип и эффективность работы устройства бортового отсоса, нарушая равномерность распределения скоростей на определенных воздухоораспределителях;

– принцип действия бортового отсоса по используемой полезной модели, исходя из проведенного исследования, полностью оправдан: комплексное использование простого типа устройства с подачей воздуха на передувку снижает требу-

емый вытяжной расход, а также позволяет создать прижимающий поток воздуха сверху, что предотвращает попадание испарений вредных веществ за кромки ванны в рабочую зону персонала;

– правильный подбор диаметров воздухопроводов на всех участках и их увязка обеспечит равномерность расхода подачи воздуха из воздухораспределителей;

– изменяя параметры моделирования можно подобрать вентиляторы для удаления воздуха от промышленной ванны и подачи подпирającego сверху воздуха, что снизит энергозатраты и позволит подобрать нужную конструкцию местного отсоса исходя из технологического процесса.

### Список литературы

1. Совершенствование конструкции местного отсоса в системах вытяжной вентиляции гальванического цеха / Б. П. Новосельцев, Д. В. Лобанов, И. И. Звенигородский, С. А. Сафонов // Жилищное хозяйство и коммунальная инфраструктура. 2022. № 4(23). С. 52-60.
2. Fan J.-N., Yang Y., Wang Y. Emission and local ventilation control of droplets generated by condensation and bubble-bursting during pickling // Sustainable Cities and Society. 2022. №76. 103491. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103491>
3. Shaptala V. V. Modeling of convective vapor-air flows near onboard Suction from open-surface reservoirs // Refractories and Industrial Ceramics. 2020. №60. P. 636-641.
4. Зингер Е. Ю. Проблема загрязнения атмосферного воздуха в гальваническом производстве и пути ее решения // Безопасность городской среды. Омск, 2022. С. 3-8.
5. Максимкова А. А. Обзор конструкций местных отсосов открытого типа с расходом // Безопасный и комфортный город. Орел, 2023. С. 585-593.
6. Нагорная А. Н., Сорокина Н. Г., Кузьменко А. Д. Энергосберегающие решения при реализации проектных решений по вентиляции гальванического производства // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2023. №23(3). С. 57-62.
7. Разработка конструкции установки химического никелирования, функционирующей в составе гальванической линии / А. Б. Борисенко, В. В. Храмцов, В. А. Немтинов, А. В. Крылов, М. А. Матрохин // Вестник Тамбовского государственного технического университета. 2021. №27 (2). С. 275-284.
8. Zeng L., Liu G., Gao J. A circulating ventilation system to concentrate pollutants and reduce exhaust volumes: Case studies with experiments and numerical simulation for the rubber refining process // Journal of Building Engineering. 2021. №35. 101984. <https://doi.org/10.1016/j.job.2020.101984>
9. Математическое моделирование течения вблизи экранированного бортового отсоса / О.А. Аверкова, Д.Н. Крутикова, И.Н. Логачев, К.И. Логачев, В.А. Уваров //

Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова. 2016. №9. С. 96-102.

10. Сотников А. Г., Боровицкий А. А. Систематизация и обобщение характеристик местных вытяжных устройств-основа инженерной методики проектирования эффективных систем промышленной вентиляции // Magazine of Civil Engineering. 2012. Т.32, №. 6. С. 54-59.

11. Богословский В.Н. Внутренние санитарно-технические устройства. Вентиляция и кондиционирование воздуха. М.: Стройиздат, 1992. 319 с.

12. Гремчук В. А. Обзор методик расчёта потребного воздухообмена для бортовых отсосов в гальванических цехах // Молодой ученый. 2024. № 13 (512). С. 24-26.

13. Шиляев М.И., Хромова Е.М., Дорошенко Ю.Н. Типовые примеры расчета систем отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха. Томск : Изд-во Том. гос. архит.-строит. ун-та, 2012. 288 с.

14. Сакова Н. В., Барская П. Ю. Обеспечение безопасности воздушной среды на предприятии // Моделирование и ситуационное управление качеством сложных систем. СПб., 2023. С. 209-213.

15. Чиняев И. Р. Методика расчёта характеристик запорно-регулирующих задвижек // Вестник Курганской ГСХА. 2012. №. 2. С. 71-73.

16. Conroy L. M., Trevelyan P. M. J., Ingham D. B. An analytical, numerical, and experimental comparison of the fluid velocity in the vicinity of an open tank with one and two lateral exhaust slot hoods and a uniform crossdraft // Annals of occupational hygiene. 2000. № 44. №. 6. P. 407–419.

17. Versteeg H.K., Malalasekera M. An Introduction to CFD Finite Volume Method. An Introduction to CFD Finite Volume Method. 2007. P. 267.

18. Шарифуллин В. М. Сравнительный анализ методик расчета бортовых отсосов // Научный журнал. 2018. №. 3(23). С. 11-13.

## References

1. Novoseltsev B.P., Lobanov D.V., Zvenigorodsky I.I., Safonov S.A. Improvement of local exhaust hood design for galvanic shop ventilation. *Zhilishchnoe khozyaistvo i kommunal'naya infrastruktura = Housing and Communal Infrastructure*. 2022; (4): 52-60. (In Russ.)

2. Fan J.-N., Yang Y., Wang Y., et al. Emission and local ventilation control of droplets generated by condensation and bubble-bursting during pickling. *Sustainable Cities and Society*. 2022; 76: 103491. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103491>

3. Shaptala V.V. Modeling of convective vapor-air flows near onboard suction from open-surface reservoirs. *Refractories and Industrial Ceramics*. 2020; 60: 636-641.5.



4. Zinger E.Y. The problem of atmospheric air pollution in galvanic production and ways to solve it. In: *Bezopasnost' gorodskoi sredy = Safety of Urban Environment*. Omsk, 2022. P. 3-8. (In Russ.)
5. Maksimkova A.A. Review of open-type local exhaust hood designs with flared openings. In: *Bezopasnyi i komfortnyi gorod = Safe and Comfortable City*. Orel, 2023. P. 585-593. (In Russ.)
6. Nagornaya A.N., Sorokina N.G., Kuzmenko A.D. Energy-saving solutions for ventilation system design in galvanic production. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arkhitektura = Bulletin of the South Ural State University*. 2023; (23): 57-62 (In Russ.).
7. Borisenko A.B., Khramtsov V.V., Nemtinov V.A., Krylov A.V., Matrokhin M.A. Development of an electroless nickel plating unit for galvanic production lines. *Vestnik Tambovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of Tambov State Technical University*. 2021; (27): 275-284. (In Russ.)
8. Zeng L., Liu G., Gao J., et al. A circulating ventilation system to concentrate pollutants and reduce exhaust volumes: Case studies with experiments and numerical simulation for the rubber refining process. *Journal of Building Engineering*. 2021; 35: 101984. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101984>
9. Averkova O.A., Krutikova D.N., Logachev I.N. Mathematical modeling of flow near a shielded onboard exhaust. *Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta im. V. G. Shukhova = Vestnik of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2016; (9): 96-102. (In Russ.).
10. Sotnikov A.G., Borovitsky A.A. Classification of local exhaust devices as the basis for engineering design of industrial ventilation systems. *Magazine of Civil Engineering*. 2012; (6): 54-59. (In Russ.)
11. Bogoslovsky V.N. Internal sanitary equipment. Ventilation and air conditioning. Moscow: Stroyizdat; 1992. P. 319 (In Russ.).
12. Gremchuk V.A. Review of methods for calculating required air exchange for onboard exhausts in galvanic shops. *Molodoi uchenyi = Young scientist*. 2024; (13): 24-26. (In Russ.)
13. Shilyaev M.I., Khromova E.M., Doroshenko Yu. N. Standard examples of HVAC system calculations. Tomsk: Izd-vo Tom. gos. arkhit.-stroit. un-ta; 2012. P. 288. (In Russ.)
14. Sakova N.V., Barskaya P.Yu. Ensuring air safety in industrial facilities. In: *Modelirovanie i situatsionnoe upravlenie kachestvom slozhnykh sistem = Modeling and Situational Quality Management of Complex Systems*. St. Petersburg, 2023. P. 209-213. (In Russ.)
15. Chinyaev I.R. Calculation method for control valve characteristics. *Vestnik Kurganskoi GSKhA = Bulletin of Kurgan State Agricultural Academy*. 2012; (2): 71-73. (In Russ.)

16. Conroy L.M., Trevelyan P.M.J., Ingham D.B. An analytical, numerical, and experimental comparison of the fluid velocity in the vicinity of an open tank with one and two lateral exhaust slot hoods and a uniform crossdraft. *Annals of Occupational Hygiene*. 2000; 44(6): 407-419.
17. Versteeg H.K., Malalasekera M. An Introduction to CFD Finite Volume Method: An Introduction to CFD Finite Volume Method, 2007, pp. 267.
18. Sharifullin V.M. Comparative analysis of onboard exhaust calculation methods. *Nauchnyi zhurnal = Scientific Journal*. 2018; (3): 11-13. (In Russ.)

---

### Информация об авторах / Information about the Authors

**Марков Никита Алексеевич**, ассистент кафедры ТГВиГ, Владимирский государственный университет им. А. Г. и Н. Г. Столетовых, г. Владимир, Российская Федерация, e-mail: mnikita.markovm@gmail.com, г. Владимир, Российская Федерация, ORCID: <http://orcid.org/0009-0001-5180-7352>

**Nikita A. Markov**, Assistant of the Heat and Gas Supply, Ventilation, and Hydraulics Department, Vladimir State University named after A.G. and N.G. Stoletovs, e-mail: mnikita.markovm@gmail.com, Vladimir, Russian Federation, ORCID: <http://orcid.org/0009-0001-5180-7352>

**Угорова Светлана Вениаминовна**, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой ТГВиГ, Владимирский государственный университет им. А. Г. и Н. Г. Столетовых, г. Владимир, Российская Федерация, e-mail: ughorova@mail.ru

**Svetlana V. Ugorova**, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Head of the Heat and Gas Supply, Ventilation and Hydraulics Department, Vladimir State University named after A.G. and N.G. Stoletovs, Vladimir, Russian Federation, e-mail: ughorova@mail.ru