

А.С. СТРОНГИН¹

¹ФГБУ «Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук» (НИИСФ РААСН), г. Москва, Россия,

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ АКТИВИРОВАННЫХ ВЫТЯЖНЫХ ЗОНТОВ ПРИ ОБЕСПЫЛИВАНИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ТРАНСПОРТА СКЛАДСКИХ ПОМЕЩЕНИЙ

Аннотация. Строгие требования к параметрам микроклимата и чистоте воздуха предъявляются к складским помещениям, особенно для хранения пищевых продуктов. Опыт эксплуатации складских помещений выявил необходимость периодического обеспыливания технологического транспорта (электрокаров и штабелеров), которое выполняется при техническом обслуживании продувкой сжатым воздухом и сопровождается сильным запылением окружающей среды. Кроме того, наблюдается образование мелкодисперсной пыли в секциях складирования поддонов.

Устранение отмеченных недостатков эффективно достигается применением активированных вытяжных зонтов, формирующих слаботурбулентные воздушные струи, локализирующие источник загрязнения. Для оценки эффективности применения активированных зонтов использован интегральный метод, базирующийся на законах сохранения импульса, массы и энергии. На примере представительного объекта проиллюстрирован расчёт параметров активированных вытяжных зонтов.

Ключевые слова: логистический комплекс, хранение пищевых продуктов, обеспыливание оборудования, вытяжной зонт, слаботурбулентные струи, сохранение баланса количества движения.

A.S. STRONGIN¹

¹Research Institute of Building Physics Russian Academy of Architecture and Construction Sciences NIISF RAASN, Moscow, Russia.

THEORETICAL SUBSTANTIATION OF THE USE OF ACTIVATED EXHAUST HOODS FOR DEDUSTING TECHNOLOGICAL TRANSPORT OF WAREHOUSE PREMISES

Abstract. Strict requirements for microclimate parameters and air cleanliness are imposed on warehouses, especially for food storage. Experience in the operation of storage facilities has shown the need for periodic dust removal of technological vehicles (electric cars and stackers), which is performed during maintenance by blowing compressed air and is accompanied by a strong dusting of the environment. In addition, the formation of fine dust in the pallet storage sections is observed.

The elimination of the noted drawbacks is effectively achieved by using activated exhaust hoods, which form weakly turbulent air jets that localize the source of pollution. To assess the effectiveness of the use of activated hoods, an integral method based on the laws of conservation of momentum, mass and energy was used. The example of a representative object illustrates the calculation of the parameters of activated exhaust hoods.

Keywords: logistic complex, food storage, equipment dedusting, exhaust hood, low-turbulent jets, maintaining the balance of momentum.

Введение

В последние годы наблюдается интенсивное строительство крупных складских и логистических комплексов, в том числе с контролируемым температурно-влажностным режимом. Строгие требования к параметрам микроклимата и чистоте воздуха предъявляются к помещениям для хранения пищевых продуктов, которые оснащаются системами искусственного охлаждения. Актуальность поставленной задачи обусловлена

необходимостью улучшения гигиенической и эпидемиологической ситуации в складских помещениях, исключения аварийных ситуаций, снижения затрат тепловой и электрической энергии.

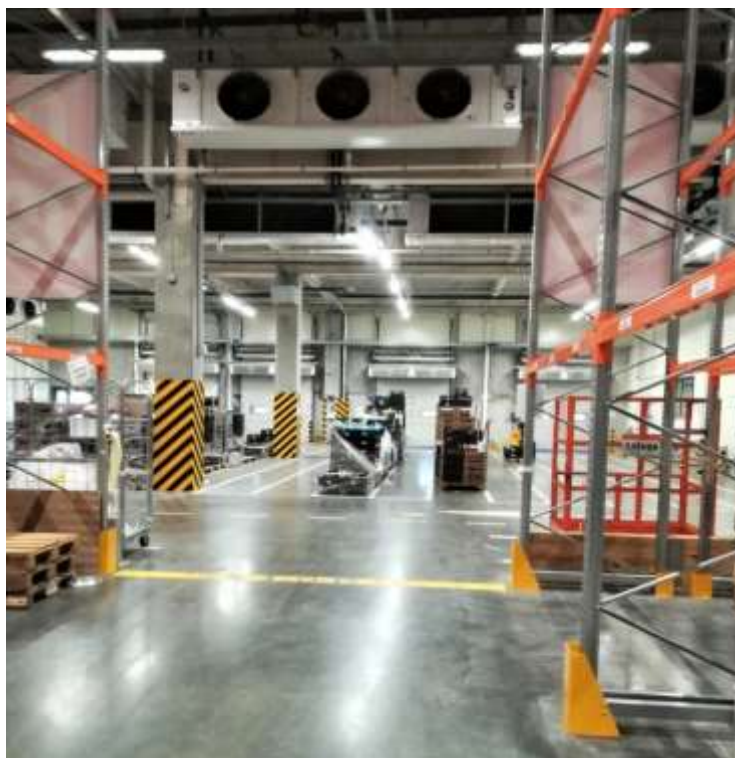


Рисунок 1 - Секция логистического центра хранения пищевых продуктов

Логистические центры хранения пищевых продуктов достигают площади более 30 000 м², высоты до 18 м, требуют значительных затрат энергоресурсов (тепловой и электрической энергии) (рисунок 1).



Рисунок 2 - Помещение технического обслуживания технологического транспорта

Опыт эксплуатации складских помещений [1,2,3] выявил необходимость периодического обеспыливания технологического транспорта (электрокаров и штабелеров), которое выполняется при техническом обслуживании продувкой сжатым воздухом (рисунок 2,3) и сопровождается сильным запылением окружающей среды. Кроме того, наблюдается образование мелкодисперсной пыли в секциях складирования поддонов.



Рисунок 3 - Кабина штабелера при проведении технического обслуживания

Локализовать распространение мелкодисперсной пыли можно применением активированного вытяжного зонта [4,5,6], конструкция которого представлена на рисунке 4.

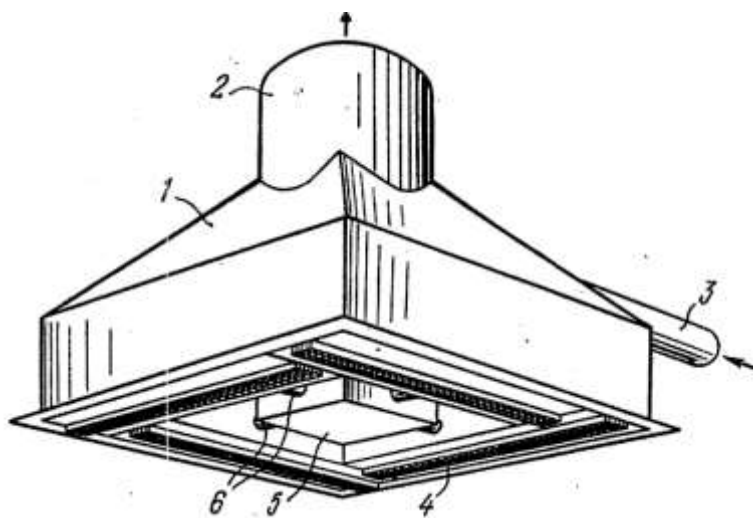


Рисунок 4 - Конструкция активированного зонта: 1 – зонт; 2 – вытяжной воздуховод; 3 – подающий воздуховод; 4 – щелевые сопла с сотовыми насадками; 5 – распределительная камера; 6 – нагревательные патрубки

Конструкция активированного зонта состоит из вытяжного короба и устройства для подачи приточного воздуха, представляющего собой плоские сопловые насадки, расположенные по периметру зонта.

На рисунке 5 приведен принцип работы активированного зонта. Приточный воздух подается в распределительную камеру и распределяется по отводящим воздуховодам к плоским сопловым насадкам 1. Сопловые насадки снабжены структурированным ячеистым наполнителем (хонейкомбом), проходя через который воздух поступает в помещение в форме стабилизированных слаботурбулентных струй 3, которые отделяют источник вредных выделений 2 от рабочей зоны помещения.

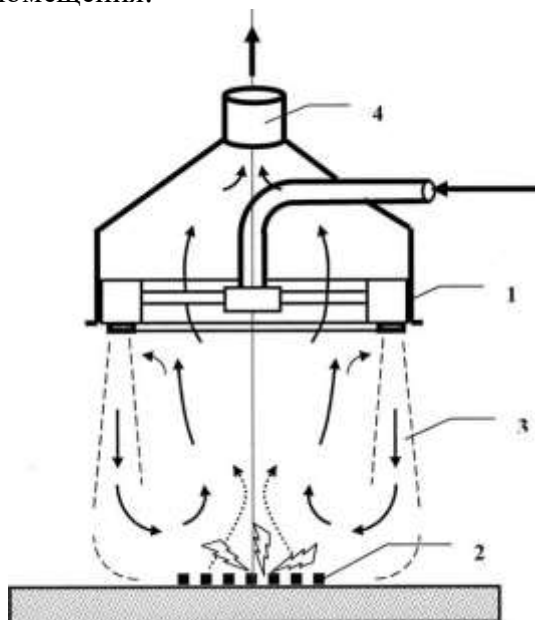


Рисунок 5 - Принцип работы активированного зонта: 1 – сопловые насадки; 2 – источник вредных выделений; 3 – слаботурбулентные струи; 4 – вытяжной воздуховод

Когда приточный воздух достигает источника вредных выделений, разрежение, создаваемое вытяжным вентилятором, разворачивает приточные струи в противоположном направлении, образуя замкнутый контур, что эффективно локализует источник вредных выделений. Загрязненный воздух поступает в вытяжной зонт и удаляется из помещения через вытяжной воздуховод 4.

Удаляемый воздух перед выбросом в атмосферу проходит очистку в пылеулавливающем устройстве.

Выбор соответствующих параметров вытяжных зонтов представляет собой сложную задачу, требующую разработки теоретических расчётных зависимостей.

Методы исследования. Теоретические предпосылки и расчётные зависимости

Теоретические предпосылки [7-13]

Расчет активированного зонта базируется на следующих предпосылках. Рассматривается двумерная изотермическая картина течения, которая описывается интегральными уравнениями законов сохранения массы, импульса и энергии [7-13].

- Уравнение закона сохранения массы (для изотермического процесса) имеет вид:

$$L_{уд} = L_0 + L_{прис} \quad (1)$$

где $L_{уд}$ – расход удаляемого воздуха, $\text{м}^3/\text{с}$.

L_0 – расход подаваемого воздуха, $\text{м}^3/\text{с}$.

$L_{прис}$ – расход воздуха, присоединенного к струе, $\text{м}^3/\text{с}$.

- Уравнение закона сохранения импульса для выделенного контура ABCD (рисунок 6) в проекции на ось X имеет вид:

$$(mV)_{DC} + (mV)_0 \cos \alpha = P_{AB} F_{AB} - P_{DC} F_{DC} \quad (2)$$

где mV – количество движения, Н;

P – давление, Па;

F – площадь, m^2 ;

α – угол выпуска струи (оптимальное значение $\alpha=0$).

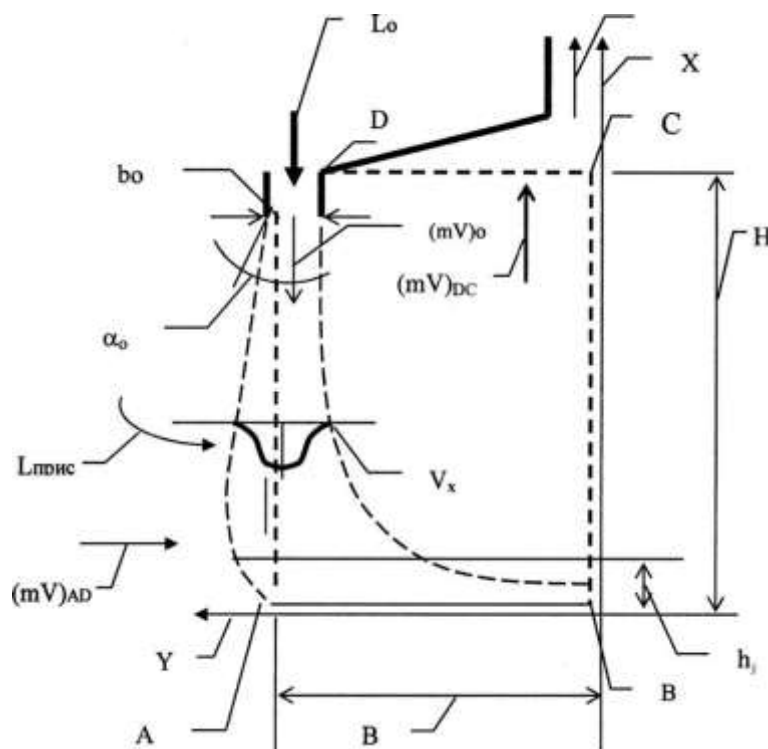


Рисунок 6 - Расчетная схема активированного зонта
 α – угол выпуска струи; mV – количество движения; h_j – высота сжатого сечения;
 b_0 – ширина щелевого насадка; L_0 – количество приточного воздуха;
 H – высота зонта над источником вредных выделений

- Уравнение Бернулли (противодавление в струе равно потерям давления на подтекание воздуха) имеет вид:

$$P_{AB} - P_{DC} = \Delta p = \frac{\zeta \rho L_{\text{прис}}^2}{2 f_{\text{прис}}^2} \quad (3)$$

где ζ – коэффициент потери давления для присоединенной массы воздуха (рассчитывается по теореме Борда);

Δp – разность аэростатических давлений в сечениях AB и DC, Па;

$f_{\text{прис}}$ – площадь присоединения воздуха: $f_{\text{прис}} = \Pi \cdot h_j$, m^2 ;

Π – периметр зонта, м;

h_j – высота сжатого сечения, м;

ρ – плотность воздуха, kg/m^3 .

- Уравнение турбулентной диффузии имеет вид:

$$q_y = G / (f_{\text{прис}} V_{\text{п}}) e^{-(VY/A)} \quad (4)$$

где q_y – концентрация в рассматриваемой точке, mg/m^3 ,

G – общее количество вредных веществ, выделяющееся в единицу времени в источнике,

mg/c ;

$V_{\text{п}}$ – скорость воздуха, подтекающего к струе, m/c ;

Y – расстояние от точки A до рассматриваемой точки;

i – отношение средней концентрации примеси в сечении $X=0$ (вблизи поверхности пола)

к соответствующей величине в удаляемом воздухе: $i = \frac{q_x}{q_{уд}}$;

A – коэффициент турбулентной диффузии в помещении, m^2/c .

Расчетные зависимости [14,15]

Совместное решение приведенных уравнений (1-4) позволило получить аналитические зависимости для расчета активированного зонта [14,15].

Количество приточного воздуха, L_0 , m^3/c , может быть рассчитано по формуле:

$$L_0 = \beta F_0 V_n / \sqrt{2} \quad (5)$$

где F_0 – площадь приточного щелевого насадка, m^2 ;

$$F_0 = b_0 \cdot \Pi \quad (6)$$

b_0 – ширина щелевого насадка, m ;

Π – периметр зонта, m ;

β – коэффициент расхода; для плоской струи составляет:

$$\beta = \frac{\sqrt{2}}{K_1} \sqrt{\frac{H}{b_0}}, \quad (7)$$

H – высота зонта над источником вредных выделений, m ,

K_1 – экспериментальный коэффициент; $K_1 = 2,5$.

Расход удаляемого воздуха, $L_{уд}$, m^3/c , составляет:

$$L_{уд} = \left(\frac{1+\beta}{2} \right) L_0 \quad (8)$$

Площадь входного сечения зонта, F_3 , m^2 , составляет:

$$F_3 = \frac{F_0}{2} \left(\frac{1-\psi}{\psi} \right)^2 \left(\frac{F_3}{\Pi H} \right)^2 \left(\frac{\beta-1}{2} \right)^2 - \left(\frac{1+\beta}{2} \right)^2 \quad (9)$$

где ψ – экспериментальный коэффициент, характеризующий относительную высоту сжатого поперечного сечения струи воздушной завесы (отношение высоты струи завесы h_j в точке поворота струи у пола внутрь контура к высоте установки зонта H , $\psi = \frac{h_j}{H} = 0,05$).

Требуемая скорость подтекания воздуха к зонту V_n , m/c , обеспечивающая нормируемую концентрацию вредных веществ на рабочем месте, составляет:

$$V_n = \frac{A}{0,434a} \lg \left(\frac{q_0}{q_a} \right) \quad (10)$$

$$A = 0,25 \varepsilon^{1/3} l^{4/3} \quad (11)$$

a – расстояние от края зонта до рабочего места, m ;

q_a – предельно допустимая концентрация вредных веществ на рабочем месте, mg/m^3 ;

q_0 – начальная концентрация вредных веществ, mg/m^3 ;

l – характерный размер, $l = H$, m ;

ε – количество кинетической энергии, диссипируемой в помещении, m^2/c^3 .

Для оценки величины ε воспользуемся интегральным методом, базирующимся на энергетическом балансе и предпосылках локальной изотропной турбулентности. В соответствии с интегральным методом, энергия, вносимая в воздушную среду помещений и затухающая в ней, складывается из энергии приточных струй, тепловых струй и энергии, вносимой движущимися предметами:

$$\varepsilon = \varepsilon_{пс} + \varepsilon_{тс} + \varepsilon_{дп}, \quad (12)$$

где $\varepsilon_{пс}$, $\varepsilon_{тс}$, $\varepsilon_{дп}$ – количество энергии, отнесённое к единице массы воздуха в единицу времени, вносимое приточными, тепловыми струями и движущимися предметами, соответственно, m^2/c^3

Величина требуемой скорости подтекания воздуха $V_{\text{п}}$ может быть ориентировочно принята исходя из нормируемой средней подвижности воздуха в рабочей зоне помещения. Чтобы устранить влияние сквозняков на работу активированного зонта, скорость подтекания рекомендуется принимать не менее, чем в 2 раза больше средней подвижности воздуха в помещении. Например, при средней подвижности 0,25 м/с, $V_{\text{п}}=0,5$ м/с.

Результаты исследования и их анализ

Проведём расчёты параметров активированных зонтов для удаления пыли на участках продувки технологического транспорта и складирования поддонов. Расчёты выполнялись по зависимостям (5-12).

Исходные данные для примеров расчёта представительного объекта приведены в таблице 1.

Таблица 1 - Исходные данные для примеров расчёта

П, м	Н, м	$V_{\text{п}}$, м/с	ε , м ² /с ³
6÷12	2÷3	0,4÷0,5	0,014÷0,016

Результаты расчётов приведены таблице 2.

Таблица 2 - Результаты расчётов активированных зонтов

Размеры в плане, м $L \times B$	Высота установки, м H	Скорость подтекания, м/с	Ширина приточной щели, м b_0	Расход воздуха, м ³ /с		
				Приточного L_0	Удаляемого $L_{\text{уд}}$	Относительный $L_{\text{уд}}/L_0$
1,5x1,5	0,5	0,266	0,025	0,266	0,798	3,0
2,0	0,5		0,05			
2,0x2,0	0,5		0,11			
2,5	0,5		0,4			
3,0x3,0	0,5	0,567	0,03	0,3	0,939	3,1
3,0	0,5		0,05			
2,0x1,5	0,5		0,11			
2,5	0,5		0,4			

Расчёты показали, что в рассматриваемом диапазоне исходных данных, расход удаляемого воздуха составляет 0,8÷2,8 м³/с, ширина приточной щели - 0,025÷0,11 м, соотношение расходов удаляемого и приточного воздуха – 2,0÷3,1.

Выводы

Активированные зонты являются эффективным средством локализующей вентиляции, в том числе для удаления мелкодисперсной пыли в местах её образования. Рассмотренный подход к расчету активированного зонта, в отличие от кинематических методов, позволяет получить однозначное решение для конструкции зонта и оптимальное соотношение для расходов приточного и удаляемого воздуха.

Максимальная эффективность работы зонта, т.е. поворот и полное замыкание приточных струй на уровне пола, может быть достигнута при единственно возможном, определяемом расчетом, соотношении геометрических параметров (F_z , П, Н, b_0) и соотношении расходов приточного и удаляемого воздуха ($L_{\text{уд}}/L_0$). Абсолютное значение расходов L_0 , $L_{\text{уд}}$ зависит от количества и степени токсичности выделяющихся вредных веществ, а также от турбулентности воздуха в помещении, определяемой диссипацией кинетической энергии ε .

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гаврилов А.Н., Повышение энергоэффективности инженерного оборудования крупных торгово-производственных центров на примере гипермаркетов сети «Глобус» // Инженерные системы. СПб.: АВОК Северо-Запад, 2017. №4.
2. Агафонова И.А., Отопление и вентиляция современных складских комплексов // АВОК, 2019. №2.
3. Гримитлин А.М., Дацюк Т.А. Отопление и вентиляция производственных помещений: Изд.-во «АВОК Северо-запад», СПб. 2007. ISBN 5-902146-19-4
4. "Industrial ventilation" Design Guide Book, chapter 7, Editors: H. Goodfellow and E. Tahti. Academic Press, 2001.
5. Гримитлин А.М., Стронгин А.С. Воздушные завесы для зданий и технологических установок: - СПб.: Изд.-во «Лань», 2018. 136с. ISBN 978-5-8114-3276-9.
6. Ventilation Guide for Automotive Industry. Editor: Alexander Zhivov. HVAC Engineering, 2000.
7. Шепелев И.А. Аэродинамика воздушных потоков в помещении. М.: Стройиздат, 1978. 144 с.
8. Гримитлин М.И. Распределение воздуха в помещениях. – 3 изд., «АВОК Северо-Запад», Санкт-Петербург, 2004. 320 с.
9. Эльтерман В.М. Вентиляция химических производств. - 3-е изд., перераб. - М., Химия, 1980. 288 с.
10. Эльтерман В.М. Охрана воздушной среды на химических и нефтехимических предприятиях. М., Химия, 1985. 160 с.
11. Zhivov A. Application of the Momentum Conservation method to the Overhead Push-Pull Hood Design // Proceedings of Seminar «Specially Engineered Local Exhaust and Intelligent Exhaust Systems», Zurich, Switzerland. 2003.
12. Strongin A. Optimization of Local Exhaust Designs for Typical Industrial Applications // Proceedings of the Industry Workshop «Industrial Process and Energy Optimization» Gettisburg, PA, USA, 2004.
13. G. Verhaeghe, "Study of air curtains used to restrict infiltration into refrigerated rooms," in G. Verhaeghe, M. V. Belleghem, A. Willockx, I. Verhaert, and M. D. Paepe, Heat Transfer. Fluid Mechanics and Thermodynamics, Proceedings of the 7th International Conference, pp. 1763-1769, 2010.
14. A.S. Strongin, A.M. Zhivov. Energy Efficient Air Curtains for Industrial Gates in Cold Climates. // HVAC 2021 Tallinn 10th International Conference Cold Climate HVAC & Energy 2021// E3S Web of Conferences 246, 08005 (2021) <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202124608005>
15. Расчёт и подбор энергоэффективных воздушных и воздушно-тепловых завес. Пособие АВОК. // М.: АВОК-ПРЕСС, 2021.- 60 с.- ISBN 978-5-98267-108-0

REFERENCES

1. Gavrilov A.N. Povichenie energoeffektivnosti ingenernogo oborudovaniya krupnich trgovoproizvodstvennich centrov na primere gipermarketov seti «Globus».[Improving the energy efficiency of engineering equipment in large trade and production centers using the example of the Globus hypermarkets] // Ingeneering systems, St. Petersburg : ABOK Nord-West, 2017. No.4. (rus)
2. Agaphonova I.A., Otoplenie i ventilyazia sovremennich skladschikh kompleksov [Heating and Ventilation of modern Warehouses] // Moscow: ABOK, 2019, No.2. (rus)
3. Grimitlin A.M., Dazuk T.A., Otoplenie i ventilyazia proizvodstvennich pomescheniy [Heating and Ventilation for industrial Premises]: ABOK Nord-West, St. Petersburg, 2007. ISBN 5-902146-19-4 (rus)
4. "Industrial ventilation" Design Guide Book, chapter 7, Editors: H. Goodfellow and E. Tahti. Academic Press, 2001.
5. Grimitlin A.M. Vozduschnie zavesi dlya zdani i tehnologicheskikh ustanovok [Air curtains for buildings and technological installations] in A.M. Grimitlin and A.S. Strongin, Doe, St.Petersburg, 2018. (rus)
6. Ventilation Guide for Automotive Industry. Editor: Alexander Zhivov. HVAC Engineering, 2000.
7. Shepelev I.A. Aerodinamika vozduschnich potokov v pomeschenii [Indoor air flow aerodynamics]. Moscow: Stroyizdat, 1978.144 p. (rus)
8. Grimitlin M.I. Raspredelenie vozduha v pomescheniyah [Indoor air distribution] – ABOK Nord-West, St. Petersburg, 2004. 320 p. (rus)
9. Elterman V.M. Ventilyazia himicheskikh proizvodstv [Ventilation of chemical plants] - Moscow., Chemistry, 1980. 288 p. (rus)
10. Elterman V.M. Ohrana vozduschnoy sredi na himicheskikh i nephtehimicheskikh predpriyatiyah [Air protection at chemical and petrochemical plants] Moscow, Chemistry, 1985. 160 p. (rus)
11. Zhivov A. Applicatihon of the Momentum Conservation method to the Overhead Push-Pull Hood Design // Proceedings of Seminar «Specially Engineered Local Exhaust and Intelligent Exhaust Systems», Zurich, Switzerland. 2003.
12. Strongin A. Optimization of Local Exhaust Designs for Typical Industrial Applications // Proceedings of the Industry Workshop «Industrial Process and Energy Optimization» Gettisburg, PA, USA, 2004.

13. G. Verhaeghe “Study of air curtains used to restrict infiltration into refrigerated rooms,” in G. Verhaeghe, M.V. Belleghem, A. Willockx, I. Verhaert, and M. D. Paepe, Heat Transfer. Fluid Mechanics and Thermodynamics, Proceedings of the 7th International Conference, pp. 1763-1769, 2010.

14. Strongin A.S., Zhivov A.M. Energy Efficient Air Curtains for Industrial Gates in Cold Climates // HVAC 2021 Tallinn 10th International Conference Cold Climate HVAC & Energy 2021 // E3S Web of Conferences 246, 08005 (2021) doi.org/10.1051/e3sconf/202124608005

15. Raschet i podbor energoeffektivnih vozdušnih i vozdušno-teplovih zaves. Posobie ABOK [Calculation and Selection of energy efficient air and heat-air curtains. Calculation Guide] // Moscow: ABOK-PRESS, 2021. 60 p. ISBN 978-5-98267-108-0 (rus)

Информация об авторе:

Стронгин Андрей Семенович

ФГБУ «Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук» (НИИСФ РААСН), г. Москва, Россия,
кандидат технических наук, ст. научный сотрудник, зав. лабораторией экологической безопасности и энергетической эффективности инженерного оборудования зданий.

E-mail: strongin@yandex.ru

Information about author:

Strongin Andrei S.

Research Institute of Building Physics Russian Academy of Architecture and Construction Sciences NIISF RAASN, Moscow, Russia,
candidate in technical sciences, chief of the laboratory of ecological safety and energy efficiency building engineering equipment.

E-mail: strongin@yandex.ru