

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 631.22.01:697.953

DOI: 10.26897/2687-1149-2021-5-25-30

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ УГЛОВОЙ КОРРЕКЦИИ ВЕКТОРА ПОТОКА СТРУИ ПРИТОЧНОГО ВОЗДУХА В СИСТЕМАХ ВЕНТИЛЯЦИИ ПРОМЫШЛЕННЫХ И СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ОБЪЕКТОВ**ИГНАТКИН ИВАН ЮРЬЕВИЧ**, *д-р техн. наук, доцент*ignatkinivan@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0003-4867-1973>

Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева, 127434, Российская Федерация, Москва, ул. Тимирязевская, 49

Аннотация. В отопительный период температура приточного воздуха ниже, чем в производственных помещениях, охлажденный воздух плотнее. Поступая в теплое помещение, он стремится вниз, и это явление приводит к образованию охлажденных и застойных зон. В статье представлено теоретическое исследование о возможности обеспечения максимальной дальности распространения неизотермической струи приточного воздуха путем угловой коррекции вектора потока на выходе из вентиляционной установки. С опорой на материалы теории бесканального распределения воздуха произведены расчеты и построен график траекторий движения потока приточного воздуха из комбинированной климатической установки с утилизацией теплоты в производственном помещении в интервале наружных температур от +10 до –40°C. С учетом длительности наружных температур построены плоские срезы трехмерного графика с шагом 10°C в диапазоне от +10 до –30°C. Установлено, что максимальная зона обслуживания установки ограничена дальностью распространения струи приточного воздуха, и ее можно увеличить путем изменения направления вектора потока на угол в диапазоне 0...34°. Значение угла наклона вектора потока струи приточного воздуха определяется полученной аппроксимационной зависимостью. С учетом регулирования вектора потока дополнена формула М.З. Печатникова для определения дальности распространения ограниченной осесимметричной струи. Проведенные исследования позволили установить зависимости дальности распространения струи приточного воздуха установки от наружной температуры и угла наклона вектора потока, а также теоретический диапазон варьирования угла наклона вектора потока, который составляет 0...34°.

Ключевые слова: вентиляция, затопленная струя, критерий Архимеда, приточная вентиляция, струйная вентиляция, неизотермическая струя.

Формат цитирования: Игнаткин И.Ю. Теоретическое обоснование угловой коррекции вектора потока струи приточного воздуха в системах вентиляции промышленных и сельскохозяйственных объектов // *Агроинженерия*. 2021. № 5(105). С. 25-30. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2021-5-25-30>.

© Игнаткин И.Ю., 2021



ORIGINAL PAPER

THEORETICAL GROUNDS FOR ANGULAR CORRECTION OF THE SUPPLY AIR JET FLOW VECTOR IN THE VENTILATION SYSTEMS OF INDUSTRIAL AND AGRICULTURAL FACILITIES**IVAN YU. IGNATKIN**, *DSc (Eng), Associate Professor*ignatkinivan@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0003-4867-1973>

Russian State Agrarian University – Moscow Agricultural Academy named after K.A. Timiryazev; 49, Timiryazevskaya st., Moscow, 127434, Russian Federation

Abstract. During the heating period, the supply air temperature is lower than that in industrial premises, and the cooled air is denser. Entering a warm room, it tends to move downward. This condition leads to the formation of chilled and stagnant zones. The article presents a theoretical study on the possibility of ensuring the maximum propagation range of a non-isothermal supply air jet by angular correction of the flow vector at the outlet of the ventilation unit. Based on the theory of free air distribution, the author analyzed and graphically visualized the flow trajectories of the supply air from the combined climate control unit with heat recovery in the production room in the range of outdoor temperatures from +10 to –40°C. Given the time period of outdoor temperatures, flat sections of a three-dimensional graph were built with a step of 10°C in the range from +10 to –30°C. The author found that the maximum service area of the installation is limited by the propagation range of the supply air jet. The area can be increased by changing the direction of the flow vector by an angle ranging between 0 and 34°. The value of the inclination angle

of the flow vector of the supply air jet is determined by the obtained approximation dependency. Considering the regulation of the flow vector, the author used the formula of M.Z. Pechatnikov to determine the propagation range of a limited axisymmetric jet. The studies carried out made it possible to establish the relationship between the propagation range of the supply air jet of the installation and the outside temperature, the inclination angle of the flow vector, and the theoretical variation range of the inclination angle of the flow vector, ranging between 0 and 34°.

Key words: ventilation, immersed jet, Archimedes criterion, supply ventilation, jet ventilation, non-isothermal jet.

For citation: Ignatkin I.Yu. Theoretical grounds for angular correction of the supply air jet flow vector in the ventilation systems of industrial and agricultural facilities. *Agricultural Engineering*, 2021; 5 (105): 25-30. (In Rus.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2021-5-25-30>.

Введение. В системах общей вентиляции промышленных и сельскохозяйственных объектов наиболее распространены диффузионная и струйная модели воздухообмена. В среднем диффузионная система обходится дороже и хорошо функционирует в регионах с мягкими зимами. В противном случае подаваемый в помещение через перфорированный потолок морозный воздух приводит к охлаждению перфорированных панелей, образованию конденсата на его поверхности, а в наиболее холодные периоды – к обмерзанию потолка и блокированию вентиляции. В гражданском строительстве для исключения описанной проблемы применяется воздухоподготовка, однако в животноводстве строительство вентиляционных камер с предварительным подогревом воздуха считается неоправданно дорогим решением, и чаще применяются более утилитарные струйные системы^{1,2} [1-9].

Предпочитая струйную вентиляцию, проектировщики и службы эксплуатации сталкиваются со сложностями распределения свежего воздуха равномерно по помещению из-за особенностей течения затопленных неизолированных приточных струй. В частности, охлажденные струи имеют свойство отклоняться от прямолинейного движения вниз («тонуть»), что объясняется действием гравитации. Подобное явление приводит к изменению дальности распространения струй приточного воздуха в зависимости от погодных условий и требует повышенного внимания^{1,3} [9].

Цель исследований: теоретическое обоснование угловой коррекции вектора потока струи приточного воздуха вентиляционных систем промышленных и сельскохозяйственных объектов, обеспечивающей максимальную дальность её распространения.

Материалы и методы. Определив тип струи, её температуру и скорость на выходе, можно вычислить траекторию её движения. Струя распространяется в помещении, насыщенном технологическим оборудованием и ограждающими конструкциями, сталкиваясь с которыми, она теряет свою энергию и затухает. В качестве критического следует принять такое сечение, ось которого достигает уровня ограждающих конструкций или технологического оборудования, а расстояние от оси струи до ограждений по вертикали следует считать

критической ординатой. Зная координаты критического сечения, можно вычислить тангенс угла наклона и скорректировать направление вектора потока (рис. 1).

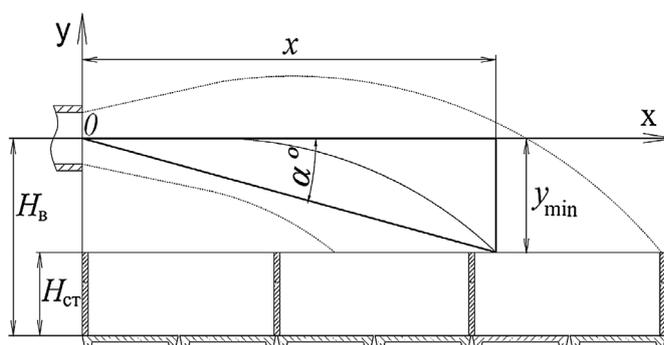


Рис. 1. Схема распространения охлажденной струи

Fig. 1. Propagation pattern of a cooled jet

Описанное выше можно записать формулой:

$$\begin{cases} y_{\min} = H_b - H_{\text{cr}} \\ y_i = f(x, Ar) \\ Ar = f(x, \Delta t, v, m, n) \\ \alpha = \arctg \frac{y}{x} \\ x < L_{\max}, \end{cases} \quad (1)$$

где L_{\max} – дальность распространения струи, м; H_{cr} – высота станка, м; H_b – расстояние от оси выпускного отверстия до пола, м; Ar – критерий Архимеда; x – абсцисса, м; Δt разность температур, °С; v – скорость струи, м/с; m, n – аэродинамический и тепловой коэффициенты.

Расчет свободных струй основывается на постоянстве импульса в поперечном сечении по всей длине распространения струи, что выражается в снижении средней скорости потока пропорционально увеличению ее поперечного сечения. Теоретически это бесконечный процесс, но практически для свободной затопленной струи средняя скорость принимается равной нулю при достижении ее значений порога достоверных инструментальных измерений.

Раскрытие свободной затопленной струи – процесс неизбежный, обусловленный возникновением касательных напряжений, вызванных трением по границе взаимодействия струи и воздуха помещения. В связи с тем, что длительность перемещения объема секундного расхода воздуха от начального до конечного сечения сравнительно мала, конвективные процессы для слабо охлажденных

¹ Гримитлин М.И. Распределение воздуха в помещениях. СПб.: АВОК Северо-Запад, 2004. 337 с.

² Гримитлин М.И. Распределение воздуха в помещениях. СПб., 1994. 238 с.

³ Баланин В.И. Микроклимат животноводческих зданий. СПб.: ПрофиКС, 2003. 140 с.

струй выражены незначительно и перемешивание происходит только по границе взаимодействия. Следовательно, допустимо считать процесс адиабатическим. Опираясь на принцип неразрывности струи, можно записать:

$$\rho_i \cdot v_i \cdot F_i = const, \quad (2)$$

где ρ_i , v_i – средние плотность и скорость струи в i -м сечении; F_i – площадь i -го поперечного сечения струи, м².

В связи с тем, что процесс адиабатических количеств теплоты струи на всем её протяжении остается неизменным,

$$c \cdot \rho_i \cdot v_i \cdot F_i \cdot \Delta t_i = const, \quad (3)$$

где c – удельная массовая теплоемкость воздуха, Дж/кг/°С.

Распределение температур и скоростей зависит от геометрической формы и размеров струи и определяется по эмпирическим зависимостям (Г. Шлихтинга, Г. Рейхардта и др.). Наиболее распространенной является формула Г. Рейхардта^{1,2} [8, 9]:

$$v = v_m \cdot e^{-0.5 \left(\frac{y}{C \cdot x} \right)^2}, \quad (4)$$

где v_m – осевая скорость, м/с; C – эмпирическая константа с вероятностным значением 0,082; x – расстояние до i -го сечения, м; y – отклонение траектории оси по вертикали, м.

Взаимосвязь инерционных и гравитационных сил определяется критерием Архимеда. В случае подогрева приточного воздуха в рекуператоре допустимо полагать, что струя приточного воздуха является слабонеизотермичной, а формула для расчета критерия Архимеда принимает вид [8]:

$$Ar_x = \frac{n}{m^2} Ar_0 \left(\frac{x}{d_0} \right)^2, \quad (5)$$

где $Ar_0 = \frac{g \cdot d_0 \cdot \Delta t_0}{v_0^2 \cdot T_{окр}}$ – критерий Архимеда для осесимметричной струи в начальном сечении; d_0 – диаметр вы-

пускного отверстия, м; Δt_0 – разность температур ядра струи и помещения на выходе из насадка, °С; v_0 – средняя скорость струи в начальном сечении, м/с.

Вертикальное отклонение оси неизотермической струи вычисляется по формуле [8]:

$$y = x \cdot Ar_x \cdot k, \quad (6)$$

где k – эмпирический коэффициент, для осесимметричных струй равный 0,6.

Свободный выход из вентилятора представляет собой цилиндрический патрубок с закручивателем. Выравнивающие поток насадки могут быть представлены протяженными цилиндрическими трубами, горизонтальными, вертикальными или радиальными жалюзи, параллельными оси потока. Технические характеристики насадок приведены в таблице⁴ [8].

Осевая скорость струи вычисляется по формуле:

$$v_m = \frac{m \cdot v_0 \cdot \sqrt{F_0}}{x}, \quad (7)$$

где m – аэродинамический коэффициент.

Избыточная или недостаточная температура осесимметричной струи определяется по формуле:

$$\Delta t_x = \frac{n \cdot \Delta t_0 \cdot \sqrt{F_0}}{x}, \quad (8)$$

где n – коэффициент изменения температуры по оси струи, $n = 4,8$ для осесимметричных струй^{3,4} [8].

Дальность распространения ограниченной осесимметричной струи находится по формуле М.З. Печатникова [8]:

$$L_{max} = 4,6 \cdot \sqrt{H_{min} \cdot B}, \quad (9)$$

где H_{min} – минимальное расстояние от технологического оборудования или ограждающих конструкций до потолка, м; B – ширина зоны, обслуживаемой одной струей, м.

Таблица

Характеристики воздухораспределительных насадок

Table

Characteristics of the air distribution nozzles

Воздухораспределительные насадки <i>Air distribution nozzles</i>	Коэффициенты <i>Coefficients</i>	
	аэродинамический, m <i>aerodynamic, m</i>	тепловой, n <i>thermal, n</i>
Цилиндрическая труба <i>Cylindrical tube</i>	6,8	4,8
Параллельные жалюзи <i>Parallel blinds</i>	4,5	3,2
Цилиндрический патрубок с закручивателем <i>Cylindrical pipe with a vortex generator:</i> $3 \leq x / \sqrt{F_0} < 8$	1,9	1,7
$8 \leq x / \sqrt{F_0} < 14$	2,5	2,4
$14 \geq x / \sqrt{F_0}$	2,8	2,7

⁴ Иванов О.П., Мамченко В.О. Аэродинамика и вентиляторы: Учебник для студентов вузов, обучающихся по специальности «Холодильные и компрессорные машины и установки». Л.: Машиностроение, Ленинградское отделение, 1986. 280 с.

В зимний период года температура приточного воздуха ниже поддерживаемой в помещении, плотность охлажденного воздуха выше нагретого, и струя тонет (рис. 2).

Для охлажденных струй дальность распространения будет ниже, чем у изотермической струи, но изменяя направление вектора потока, ею можно управлять, достигая максимально возможной дальности распространения [8].

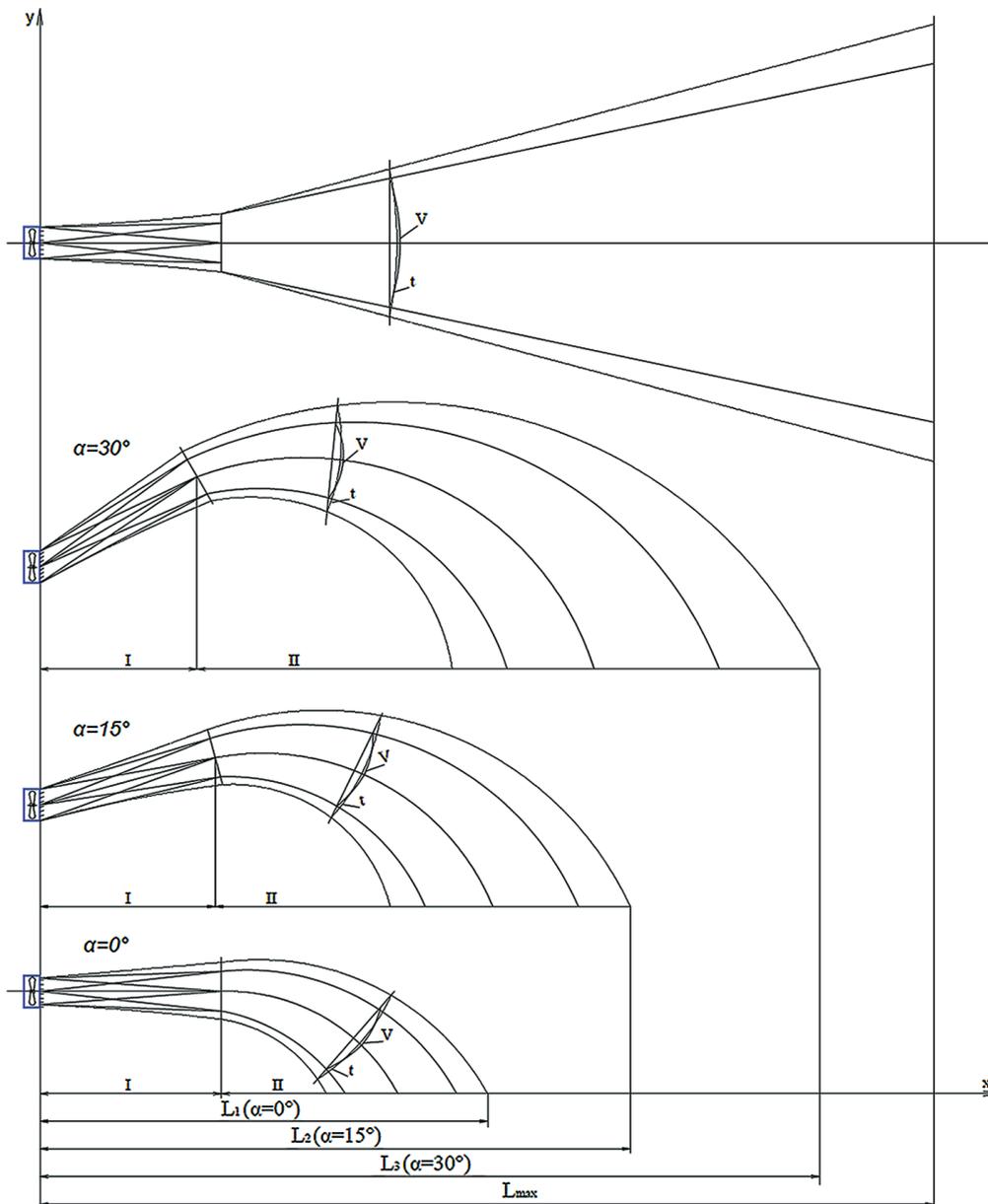


Рис. 2. Дальность распространения неизотермической струи

Fig. 2. Propagation range of a non-isothermal jet

Результаты и обсуждение. Результаты представлены в поверхностном графике, отражающем изменение траектории струи в зависимости от наружной температуры и удаленности от насадка (рис. 3).

В Московской области 93% времени отопительного периода окружающая температура не опускается ниже -16°C , 84% периода ограничивается -10°C , а 51% длительности отопительного периода температура колеблется в рамках $\pm 4^\circ\text{C}$. Подобная картина наблюдается во всем Центральном федеральном округе и принципиально описывает российский климат в целом. Поэтому целесообразно сделать плоские срезы с шагом 10°C в диапазоне от $+10$ до -30°C (рис. 4) [8].

Из графика рисунка 4 следует, что диапазон углов наклона жалюзи варьирует в интервале $0 \dots 34^\circ$. Максимальная дальность распространения струи обеспечивается изменением угла наклона вектора потока на необходимый угол, значение которого определяется зависимостью $\alpha = -0,65t_n + 14,9$.

Принимая во внимание снижение дальности распространения охлажденных струй и коррекцию направления потока, формулу (9) следует дополнить:

$$\begin{cases} L_{max} = 4,6 \cdot \cos\alpha \cdot \sqrt{H_{min} \cdot B} \\ \alpha = -0,65t_n + 14,9. \end{cases} \quad (10)$$

По результатам исследований установлены зависимости дальности распространения приточного воздуха

от угла наклона потока на выходе из установки и температуры наружного воздуха. Теоретически определен

диапазон изменения угла наклона потока приточного воздуха, составляющий 0...34°.

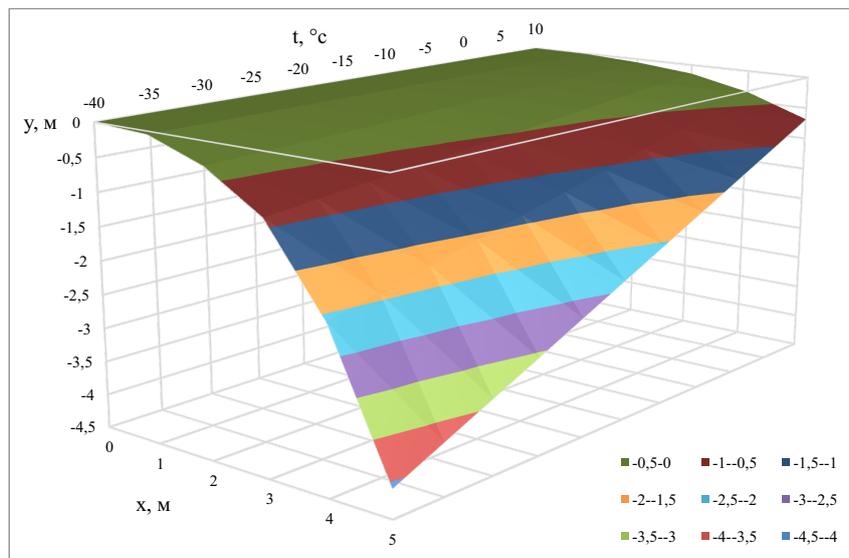


Рис. 3. Зависимость ординаты оси потока от температуры наружного воздуха и удаленности i -го сечения от насадки

Fig. 3. Relationship among the flow axis ordinate, the outside air temperature and the distance of the i^{th} section from the nozzle

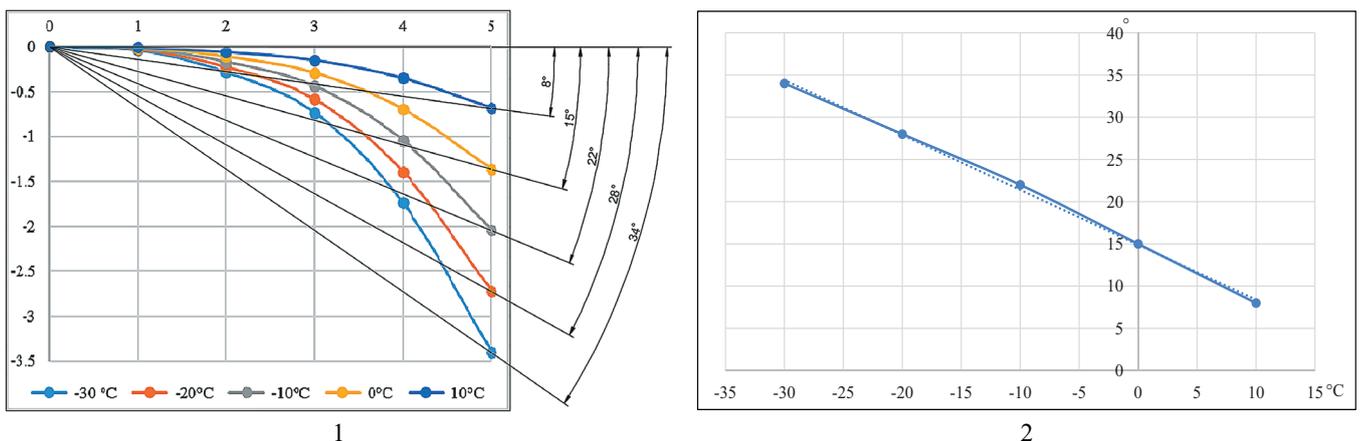


Рис. 4. Зависимость угла коррекции потока от наружной температуры:

- 1) осевые траектории струй;
- 2) значение угла коррекции потока приточного воздуха в зависимости от наружной температуры

Fig. 4. Relationship between the flow correction angle and the outside temperature:

- 1) axial trajectories of the jets;
- 2) value of the correction angle of the supply air flow depending on the outside temperature

Выводы

1. При организации притока свежего воздуха в помещение в режиме неизотермических струйных течений целесообразно компенсировать отклонение от прямолинейного движения струи изменением скорости, характера или направления вектора потока.

2. В зависимости от конкретных объемно-планировочных решений задачу равномерной воздухоподачи по всей площади помещения можно решать управлением угла раскрытия струи за счет установки насадок: успокоителей, конфузоров, жалюзи, закрывателей.

3. Охлажденные затопленные струи склонны тонуть, и для увеличения дальности распространения струи приточного воздуха ее целесообразно «успокаивать», разгонять и направлять вверх под углом от 0 до 34° к горизонту. Перечисленные меры можно применять одновременно или по отдельности.

4. Полученная математическая модель позволяет в зависимости от температуры охлажденной струи определить угол наклона вектора потока, обеспечивающий максимальную дальность её распространения.

В продолжение работы планируются экспериментальные исследования полученных теоретических материалов.

Библиографический список

1. Tikhomirov D.A., Trunov S.S., Kuzmichev A.V. et al. Energy-efficient thermoelectric unit for microclimate control on cattlebreeding premises. *Energy Reports*. 2020. 6: 293-305. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2020.08.052>
2. Shatsky V.P., Vysotskaya Zh.V., Gulevsky V.A. To the question about work of water-evaporating coolers. *Scientific Herald of the Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering. Construction and Architecture*. 2009. № 3-4 (3-4): 46-51.
3. Gulevsky V.A., Ryazantsev A.A., Nikulichev A.A. et al. Mathematical modeling of processes of heat and mass transfer in channels of water evaporating coolers. *Journal of Physics: Conference Series*, 2018; 1015: 032052. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1015/3/032052>
4. Ershova I., Vasilyev A., Samarin G. et al. Development of the experimental heat exchanger for obtaining energy from phasetransition water-ice. *International Transaction Journal of Engineering, Management and Applied Sciences and Technologies*. 2019. Paper ID: 11A02R. <https://doi.org/10.14456/ITJEMAST.2020.38>
5. Tikhomirov D.A., Dudin S.N., Trunov S.S. et al. Combined electric accumulation unit for air heating. *Revista de la Universidad del Zulia*, 2019; 10 (27): 168-183.
6. Shatsky V.P., Gulevsky V.A., Chesnokov A.S. Joint modelling of heat and mass transfer and aerodynamic processes in evaporative water coolers. *Scientific Herald of the Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering. Construction and Architecture*, 2012; 3 (15): 26-32.
7. Tikhomirov D., Vasilyev A.N., Budnikov D. et al. Energy-saving automated system for microclimate in agricultural premises with utilization of ventilation air. *Wireless Networks*, 2020; 26: 4921-4928. <https://doi.org/10.1007/s11276-019-01946-3>
8. Кирсанов В.В., Игнаткин И.Ю. Струйная модель притока вентиляционного воздуха из теплоутилизационной установки // Вестник ФГОУ ВПО «МГАУ имени В.П. Горячкина». 2018. № 2 (84). С. 28-32. <https://doi.org/10.26897/1728-7936-2018-2-28-32> (In Rus.)
9. Кирсанов В.В., Игнаткин И.Ю. Оценка характера распределения приточного воздуха в условиях струйных течений // Вестник ФГОУ ВПО «МГАУ имени В.П. Горячкина». 2018. № 3 (85). С. 35-41. <https://doi.org/10.26897/1728-7936-2018-3-35-41> (In Rus.)

Критерии авторства

Игнаткин И.Ю. выполнил теоретические исследования, на основании полученных результатов провел обобщение и подготовил рукопись. Игнаткин И.Ю. имеет на статью авторские права и несет ответственность за плагиат.

Статья поступила в редакцию 22.03.2021

Одобрена после рецензирования 23.06.2021

Принята к публикации 25.06.2021

References

1. Tikhomirov D.A., Trunov S.S., Kuzmichev A.V. et al. Energy-efficient thermoelectric unit for microclimate control on cattlebreeding premises. *Energy Reports*. 2020. 6: 293-305. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2020.08.052>
2. Shatsky V.P., Vysotskaya Zh.V., Gulevsky V.A. To the question about work of water-evaporating coolers. *Scientific Herald of the Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering. Construction and Architecture*. 2009. № 3-4 (3-4): 46-51.
3. Gulevsky V.A., Ryazantsev A.A., Nikulichev A.A. et al. Mathematical modeling of processes of heat and mass transfer in channels of water evaporating coolers. *Journal of Physics: Conference Series*, 2018; 1015: 032052. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1015/3/032052>
4. Ershova I., Vasilyev A., Samarin G. et al. Development of the experimental heat exchanger for obtaining energy from phasetransition water-ice. *International Transaction Journal of Engineering, Management and Applied Sciences and Technologies*. 2019. Paper ID: 11A02R. <https://doi.org/10.14456/ITJEMAST.2020.38>
5. Tikhomirov D.A., Dudin S.N., Trunov S.S. et al. Combined electric accumulation unit for air heating. *Revista de la Universidad del Zulia*, 2019; 10 (27): 168-183.
6. Shatsky V.P., Gulevsky V.A., Chesnokov A.S. Joint modelling of heat and mass transfer and aerodynamic processes in evaporative water coolers. *Scientific Herald of the Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering. Construction and Architecture*, 2012; 3 (15): 26-32.
7. Tikhomirov D., Vasilyev A.N., Budnikov D. et al. Energy-saving automated system for microclimate in agricultural premises with utilization of ventilation air. *Wireless Networks*, 2020; 26: 4921-4928. <https://doi.org/10.1007/s11276-019-01946-3>
8. Kirsanov V.V., Ignatkin I.Yu. Struynaya model' pritoka ventilyatsionnogo vozdukha iz teploutilizatsionnoy ustanovki [Jet model of ventilation air inflow from a heat recovery unit]. *Vestnik of Moscow Goryachkin Agroengineering University*, 2018; 2 (84): 28-32. <https://doi.org/10.26897/1728-7936-2018-2-28-32> (In Rus.)
9. Kirsanov V.V., Ignatkin I.Yu. Otsenka kharaktera raspredeleniya pritochnogo vozdukha v usloviyakh struynykh techeniy [Assessment of the supply air distribution pattern under jet stream conditions]. *Vestnik of Moscow Goryachkin Agroengineering University*, 2018; 3 (85): 35-41. <https://doi.org/10.26897/1728-7936-2018-3-35-41> (In Rus.)

Contribution

I.Yu. Ignatkin performed theoretical studies, and based on the results obtained, generalized the results and wrote a manuscript. I.Yu. Ignatkin has author's rights and bear equal responsibility for plagiarism.

The paper was received 22.03.2021

Approved after reviewing 23.06.2021

Accepted for publication 25.06.2021