

**КИРСАНОВ ВЛАДИМИР ВЯЧЕСЛАВОВИЧ**, докт. техн. наук, профессор<sup>1</sup>

E-mail: kirvv2014@mail.ru

**ИГНАТКИН ИВАН ЮРЬЕВИЧ**, канд. техн. наук, доцент<sup>2</sup>

E-mail: ignatkinivan@gmail.com

<sup>1</sup> Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 127550, ул. Тимирязевская, 49, Москва, Российская Федерация

<sup>2</sup> Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана; 105005, ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1, Москва, Российская Федерация

## СТРУЙНАЯ МОДЕЛЬ ПРИТОКА ВЕНТИЛЯЦИОННОГО ВОЗДУХА ИЗ ТЕПЛОУТИЛИЗАЦИОННОЙ УСТАНОВКИ

Рассмотрена струйная модель притока вентиляционного воздуха из теплоутилизационной установки. Допущения: приток и вытяжка вентиляционного воздуха осуществляются с механическим побуждением осевыми вентиляторами; приточный воздух поступает в помещение непосредственно из вентилятора без насадок и воздухопроводов, что образует всасывающий факел и приточную струю. Учитывая Архимедову силу и общие закономерности струйных течений, построена модель распределения воздуха в помещении, позволяющая определить осевую скорость струи на удалении от выпускного отверстия и оценить траекторию распространения струи. Адекватность расчетной модели проверялась экспериментально в секции откорма свиноводческой фермы ООО «Мортадель». В рассматриваемом случае приточный воздух имел температуру ниже, чем в помещении, что привело к отклонению траектории струи в направлении действия гравитации. Адекватность, достоверность и точность модели удовлетворяют точности необходимой для практических расчетов. Приведены графики зависимости скорости струи от удаления от выпускного отверстия. Полученная модель позволяет вычислять траекторию движения струи, что дает возможность реализовать алгоритм коррекции вектора потока с целью обеспечения требуемой дальности в текущих погодных условиях. Установлено, что расхождение теоретических и экспериментальных данных не превышает 12,9%. Точность результатов во многом зависит от эмпирических коэффициентов, определяющих темп изменения скорости и разницы температур в струе. В дальнейшем планируется провести исследования профилей всасывающего факела и приточных струй в продольном и поперечном сечениях.

**Ключевые слова:** вентиляция, микроклимат, отопление, рекуперация теплоты, свиноводство, система микроклимата, струйные течения, утилизация теплоты.

**Введение.** Микроклимат оказывает существенное влияние на продуктивность животных [1-8].

Эффективность ассимиляции вредных веществ оценивается не столько усредненным значением удельного воздухообмена, сколько локальным микроклиматом в каждом станке.

В промышленном животноводстве поддерживается высокая концентрация содержания животных. И обеспечение необходимого микроклимата предполагает высокие кратности воздухообмена. Струйные системы вентиляции – наиболее доступный способ реализации этой задачи обеспечения требуемого воздухообмена в животноводстве [6, 7].

Согласно многочисленным исследованиям, характер распределения полей концентрации и температуры определяется струйными течениями. Причем важен не только сам факт наличия струй, сколько их характеристика и результат взаимодействия [8].

В системах вентиляции приточные струи попадают в воздушную среду помещения, что относит их к «затопленным». В зависимости от соотношения температур окружающего воздуха, струи делятся на: изотермические (с постоянной температурой) и неизотермические струи. Режим течения струй бывает ламинарным и турбулентным. Различают свободные (распространяющиеся без ограничений) и несвободные струи, прямоочные и закрученные. Струи движущиеся по поверхности называются полуограниченными [9].

Процесс обеспечения микроклимата в животноводческом помещении посредством универсальной приточно-вытяжной установки с утилизацией теплоты вытяжного воздуха сталкивается с проблемой равномерного распределения приточного воздуха, что необходимо для ассимиляции водяных паров, вредных газов и избыточной теплоты.

**Цель исследования** – определение теоретической зоны распространения приточного воздуха от одной бесканальной установки обеспечения микроклимата.

**Материал и методы.** Объект исследований – бесканальные системы микроклимата. Предмет исследований – закономерности распространения приточного воздуха в режиме течения неизоэтермической струи. Используются материалы теоретических и экспериментальных исследований, метод научного обобщения информации, осуществлена обработка данных, полученных эмпирическим путем.

Рассмотрим задачу со следующими условиями и допущениями: приток и вытяжка вентиляционного воздуха осуществляются с механическим побуждением осевыми вентиляторами; приточный воздух поступает в помещение непосредственно из вентилятора без насадок и воздухопроводов, что образует всасывающий факел и приточную струю. Последняя осесимметричная, так как выходит из круглого отверстия, слабо закрученная, изотермическая (рис. 1, а) или неизоэтермическая (рис. 1 б, в), в зависимости от температур струи и окружающей среды.

Необходимо привести закономерности распределения приточного воздуха в помещении в виде неизоэтермических струй.

**Результаты и обсуждение.** Изотермические струи распространяются прямолинейно, неизоэтермические подвержены влиянию силы Архимеда, следовательно, в зависимости от температуры струи будут «всплывать» (рис. 2, б), или «тонуть» (рис. 2, в).

В струях всех типов выделяют начальный и основной участки. На начальном идет формирование струи, профили температуры и скорости совпадают. Для основного участка приточной струи характерен постоянный угол раскрытия струи, подтвержденный многократными исследованиями и составляющий 12°25' [9].

Расчет свободных струй базируется на постоянстве импульса в поперечном сечении по всей длине струи, математически это выражается зависимостью:

$$\rho_0 \cdot V_0 \cdot F_0^2 = \int \rho \cdot V \cdot dF,$$

где  $\rho_0$  – плотность струи у истока, кг/м<sup>3</sup>;  $V_0$  – скорость струи у истока, м/с;  $F_0$  – площадь выпускного отверстия, м<sup>2</sup>.

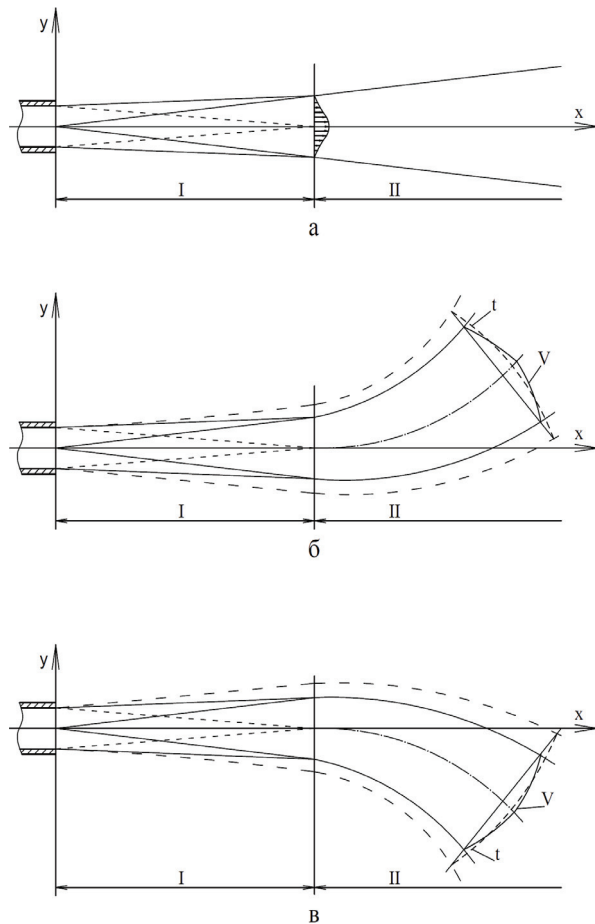
Количество теплоты на всем протяжении струи остается неизменным:

$$c \cdot \rho_0 \cdot V_0 \cdot \Delta t_0 = \int c \cdot \rho \cdot V \cdot \Delta t \cdot dF.$$

Распределение скоростей и температур зависит от геометрического замера струи и определяется по различным эмпирическим зависимостям (Г. Шлихтинга, Г. Рейхардта, М.И. Грмилинга), наиболее распространенной из которых является формула Г. Рейхардта [8-10]:

$$V = V_m \cdot e^{-0,5 \left( \frac{y}{c \cdot x} \right)^2},$$

где  $V_m$  – осевая скорость, м/с;  $c$  – эмпирическая постоянная с вероятностным значением 0,082;  $x$  – расстояние до рассматриваемого сечения, м;  $y$  – вертикальное отклонение траектории, м.



**Рис. 1. Схемы струй: а – изотермическая; б – неизоэтермическая нагретая; в – неизоэтермическая охлажденная; I – начальный участок; II – основной участок**

Взаимосвязь гравитационных и инерционных сил оценивается начальным и текущим критериями Архимеда:

$$Ar_0 = \frac{g \cdot d_0 \cdot \Delta t_0}{V_0^2 \cdot T_{окр}}; \quad Ar_x = \frac{n}{m^2} \cdot Ar_0 \cdot x^2,$$

где  $d_0$  – диаметр выпускного отверстия, м;  $\Delta t_0$  – начальная разница температур струи и окружающей среды, °С;  $V_0$  – начальная скорость струи, м/с;  $T_{окр}$  – абсолютная температура окружающей среды, К;  $m$  – аэродинамический коэффициент 1,0;  $n$  – коэффициент изменения температуры по оси струи, равный 0,6 [9, 10].

Осевая скорость струи вычисляется по формуле:

$$V_m = \frac{m \cdot V_0 \cdot \sqrt{F_0}}{x}$$

Избыточная или недостаточная температура осесимметричной струи определяется по формуле:

$$\Delta t_x = \frac{n \cdot \Delta t_0 \cdot \sqrt{F_0}}{x}$$

Вертикальное отклонение оси неизотермической струи вычисляется по формуле:

$$y = x \cdot Ar_x \cdot k,$$

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

Адекватность расчетной модели проверялась экспериментально в секции откорма свиноводческой фермы ООО «Мортадель». В рассматриваемом случае приточный воздух имеет температуру ниже, чем в помещении, что приводит к отклонению траектории струи в направлении действия гравитации. Компенсировать это можно применяя параллельные жалюзи, наклоненные вверх. Угол наклона жалюзи к горизонту целесообразно регулировать в зависимости от температуры приточной струи [11].

На рисунке 2 приведены графики зависимости скорости струи от удаления от выпускного отверстия.

Согласно графикам, приведенным на рисунке 2, расхождение теоретических и экспериментальных данных не превышает 12,9%.

Струя приточного воздуха холоднее окружающей среды, следовательно, она «тонет». Ее траектория приведена на рисунке 3.

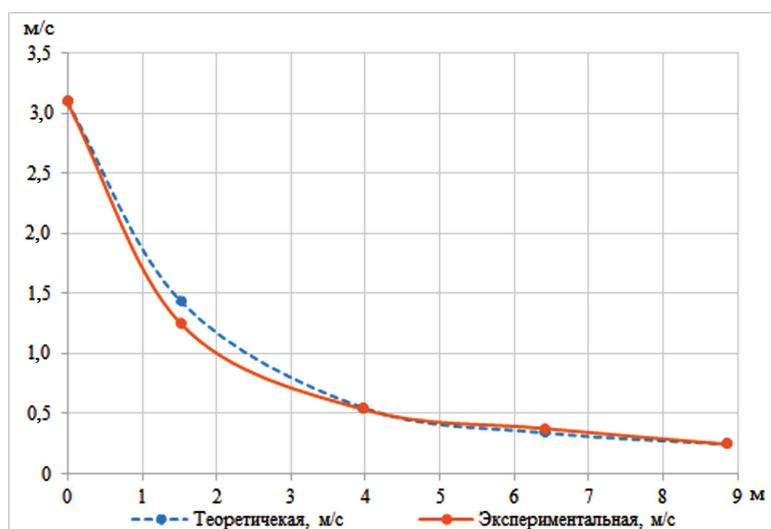


Рис. 2. Изменение скорости струи на выходе из рекуператора

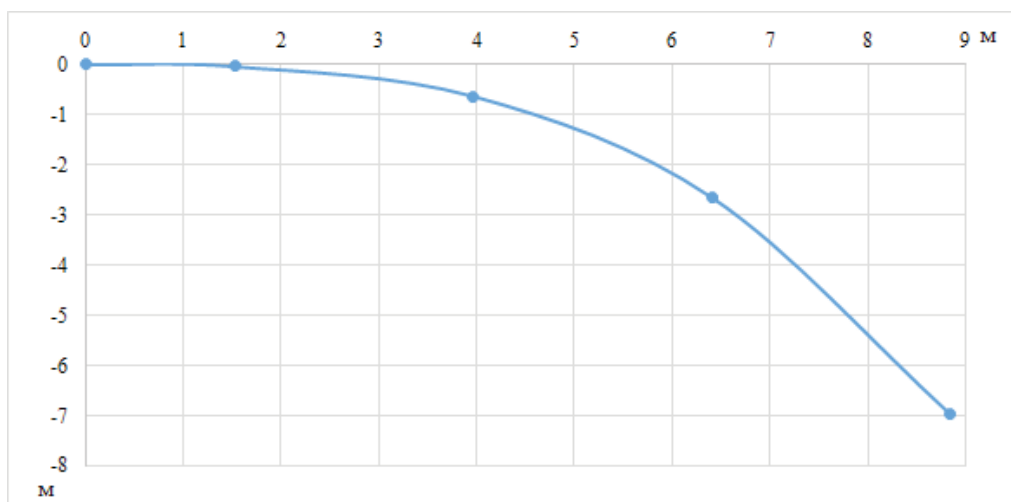


Рис. 3. Траектория течения струи

Модель затопленного неизотермического струйного течения приточного воздуха позволяет с достаточной точностью определить характер распределения свежего воздуха и дать рекомендации по размещению вентиляционного оборудования.

### Выводы

Полученные результаты подтверждают достоверность, адекватность и достаточную точность модели. В то же время следует отметить, что точность результатов во многом зависит от эмпирических коэффициентов, определяющих темп изменения скорости и разницы температур в струе. В дальнейшем планируется провести исследования профилей всасывающего факела и приточных струй в продольном и поперечном сечениях.

### Библиографический список

1. Механизация и технология животноводства / В.В. Кирсанов, Д.Н. Мурусидзе, В.Ф. Некрашевич, В.В. Шевцов, Р.Ф. Филонов: Учебник. М., 2013. 585 с.
2. Гулевский В.А., Шацкий В.П., Спирина Н.Г. Применение теплообменников (рекуператоров) для нормализации микроклимата животноводческих помещений // Известия ВУЗов. Строительство. Новосибирск. 2013. № 9. С. 64-68.
3. Гулевский В.А., Шацкий В.П. Моделирование теплообмена в пластинчатых теплообменниках // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. 2012. № 2. С. 140-144.
4. Кирсанов В.В., Игнаткин И.Ю. Энергоэффективная автоматизированная система микроклимата // Вестник ФГОУ ВПО «МГАУ имени В.П. Горюхина». 2016. № 6 (76). С. 48-51.
5. Игнаткин И.Ю., Казанцев С.П. Рекуператор теплоты для свиноводческого комплекса // Механизация и электрификация сельского хозяйства. 2013. № 4. С. 17-18.
6. Кононенко А.С., Киселев Р.В. Восстановление радиаторов // Сельский механизатор. 2004. № 6. С. 22-23.
7. Кирсанов В.В., Игнаткин И.Ю. Универсальная установка обеспечения микроклимата // Вестник НГИЭИ. 2016. № 8 (63). С. 110-116.
8. Кузьмин М.С., Овчинников П.А. Вытяжные и воздухораспределительные устройства. М.: Стройиздат, 1987. 168 с.
9. Иванов О.П., Мамченко В.О. Аэродинамика и вентиляторы: Учеб. для студентов вузов, обучающихся по специальности «Холодильные и компрессорные машины и установки». Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1986. 280 с.
10. Гримитлин М.И. Распределение воздуха в помещениях. СПб.: АВОК Северо-Запад, 2004, 337 с.
11. Игнаткин И.Ю., Бондарев А.М., Курячий М.Г., Путан А.А., Архипцев А.В. Опыт внедрения системы рекуперации тепла вентиляционного воздуха в систему поддержания микроклимата в свиноводстве ООО «Фирма «Мортадель» // Инновации в сельском хозяйстве. 2014. № 4 (9). С. 256-261.

Статья поступила 20.09.2017

## JET MODEL OF VENTILATION AIR INFLOW FROM HEAT-RECOVERY UNIT

**VLADIMIR V. KIRSANOV, DSc (Eng), Professor<sup>1</sup>**

E-mail: kirvv2014@mail.ru

**IVAN Yu. IGNATKIN, PhD (Eng), Associate Professor<sup>2</sup>**

E-mail: ignatkinivan@gmail.com

<sup>1</sup> Russian Timiryazev State Agrarian University; 127550, Timiryazevskaya Str., 49, Moscow, Russian Federation

<sup>2</sup> Bauman Moscow State Technical University; 105005, 2<sup>nd</sup> Baumanskaya Str., 5, bld. 1, Moscow, Russian Federation

The paper considers a jet model of the ventilation air inflow from a heat recovery unit. The authors proceed from an assumption that the inflow and exhaust of ventilation air is produced mechanically with axial fans; supply air enters the room directly from the fan without nozzles and air ducts, which forms a suction plume and a supply jet. Taking into account Archimede's buoyant force and general laws of jet streams, the authors have designed a model of indoor air distribution, which makes it possible to determine axial velocity of the jet at a distance from the outlet and estimate the trajectory of the jet propagation. The adequacy of the design model has been tested experimentally in the fattening section of a pig farm of LLC "Mortadel". In the considered case, the inflow air featured a temperature lower than the indoor one, which led to a deviation of the jet trajectory in the direction of gravity. The adequacy, reliability and accuracy of the model comply with the accuracy required for practical

calculations. The paper provides graphical dependencies of the jet velocity and the distance from the outlet. The obtained model allows calculating the trajectory of the jet motion, which enables us to implement the flow vector correction algorithm to ensure the required range in current weather conditions. It has been established that the discrepancy between theoretical and experimental data does not exceed 12.9%. The accuracy of the results depends to a large extent on the empirical coefficients that determine the velocity change rate and the temperature difference in the jet. In the future, it is planned to study the profiles of the suction plume and the supply jets in longitudinal and cross sections.

**Key words:** ventilation, microclimate, heating, heat recovery, hog breeding, microclimate system, jet streams, heat utilization.

### References

1. Kirsanov V.V., Murusidze D.N., Nekrashevich V.F., Shevtsov V.V., Filonov R.F. Mekhanizatsiya i tekhnologiya zhitovnovodstva [Mechanization and technology of livestock breeding]. Moscow, 2013. 585 p. (in Rus.)
2. Gulevskiy V.A., Shatskiy V.P., Spirina N.G. Primeneniye teploobmennikov (rekuperatorov) dlya normalizatsii mikroklimata zhitovnovodcheskikh pomeshcheniy [Application of heat exchangers (recuperators) for the microclimate control in cattle-breeding facilities]. *Izvestiya VUZov. Stroitel'stvo*. Novosibirsk. 2013. No. 9. Pp. 64-68. (in Rus.)
3. Gulevskiy V.A., Shatskiy V.P. Modelirovaniye teploobmena v plastinchatykh teploobmennikakh [Modeling of heat exchange in plate heat exchangers]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2012. No. 2. Pp. 140-144. (in Rus.)
4. Kirsanov V.V., Ignatkin I.Yu. Energoeffektivnaya avtomatizirovannaya sistema mikroklimata [Energy-efficient automated microclimate control system]. *Vestnik of Moscow Goryachkin Agroengineering University*. 2016. No. 6 (76). Pp. 48-51. (in Rus.)
5. Ignatkin I.Yu., Kazantsev S.P. Rekuperator teploty dlya svinovodcheskogo kompleksa [Heat recuperator for pig-breeding facilities]. *Mekhanizatsiya i elektrifikatsiya sel'skogo khozyaystva*. 2013. No. 4. Pp. 17-18. (in Rus.)
6. Kononenko A.S., Kiselev R.V. Vosstanovleniye radiatorov [Restoration of radiators]. *Sel'skiy mekhanizator*. 2004. No. 6. Pp. 22-23. (in Rus.)
7. Kirsanov V.V., Ignatkin I.Yu. Universal'naya ustanovka obespecheniya mikroklimata [Universal installation of microclimate control]. *Vestnik NGIEI*. 2016. No. 8 (63). Pp. 110-116. (in Rus.)
8. Kuz'min M.S., Ovchinnikov P.A. Vytyazhnyye i vozdukhoraspredelitel'nyye ustroystva [Air exhaust and distribution devices]. Moscow, Stroyizdat, 1987. 168 p. (in Rus.)
9. Ivanov O.P., Mamchenko V.O. Aerodinamika i ventilyatory: Ucheb. dlya studentov vuzov, obuchayushchikhsya po spetsial'nosti "Kholodil'nyye i kompressornyye mashiny i ustanovki" [Aerodynamics and fans: Manual for university students of the study area "Refrigeration and Compressor Machines and Installations"]. L.: Mashinostroyeniye, Leningr. otd-niye, 1986. 280 p. (in Rus.)
10. Grititlin M.I. Raspredeleniye vozdukha v pomeshcheniyakh [Indoor air distribution]. SPb.: AVOK Severo-Zapad, 2004, 337 p. (in Rus.)
11. Ignatkin I.Yu., Bondarev A.M., Kuryachiy M.G., Putan A.A., Arkhiptsev A.V. Opyt vnedreniya sistemy rekuperatsii tepla ventilyatsionnogo vozdukha v sistemu podderzhaniya mikroklimata v svinarnike OOO "Firma "Mortadel"" [Experience of introducing the system of ventilation air heat recovery into the microclimate control system in a pigsty of LLC "Firma "Mortadel""]. *Innovatsii v sel'skom khozyaystve*. 2014. No. 4 (9). S. 256-26 (in Rus.)

*The paper was received on September 20, 2017*