

## **МЕХАНІКО-ТЕХНОЛОГІЧНІ ПРОЦЕСИ, РОБОЧІ ОРГАНИ ТА МАШИНИ ДЛЯ ТВАРИННИЦТВА**

УДК 631.22

### **Модель швидкості повітря в струмені**

**Братішко В. В.**, д.т.н., с.н.с., Національний науковий центр «Інститут механізації та електрифікації сільського господарства» НААН України

#### **Анотація**

**Мета.** Уточнення математичної моделі швидкості руху середовища в повітряному струмені.

**Методи.** Теоретичні положення елементарної математики та механіки рідин і газів.

**Результати.** На основі припущення, що повітряний струмінь за геометричною формою являє собою кульовий сектор, а місцем розташування точок струменя, рівновіддалених від сопла в окремий момент часу, є сферичний сегмент, із застосуванням принципу збереження кількості руху було уточнено математичну модель

швидкості руху середовища в повітряному струмені.

**Висновки.** У результаті теоретичних досліджень отримано в загальному вигляді математичну модель швидкості руху повітряного струменя. Застосування отриманої моделі, порівнюючи з існуючими, дає змогу підвищити точність розрахунків руху повітряного середовища в струмені, наприклад, під час розрахунку параметрів систем мікроклімату тваринницьких приміщень.

**Ключові слова:** кут розширення струменя, сопло, струмінь, сферичний сегмент, швидкість повітря

UDC 631.22

### **Model of the air velocity in the stream**

**Bratishko V.V.**, Sc.D., National Science Center "Institute for agricultural engineering and electrification" NAAS of Ukraine

#### **Annotation**

**Purpose.** Correction of the mathematical model of the medium velocity in the air jet.

**Methods.** Theoretical positions of elementary mathematics and mechanics of liquids and gases.

**Results.** Based on the assumption that the air jet in geometric form is a ball segment, and the location of the jet points equidistant from the nozzle at a particular moment of time is a spherical segment, and using the principle of preserving the amount of motion, the

mathematical model of the velocity of the medium in the air stream was specified.

**Conclusions.** As a result of theoretical studies, a mathematical model of the velocity of the air jet was obtained in general. Application of the obtained model, in comparison with the existing, allows to improve the accuracy of calculations of air flow in the jet, for example, when calculating the parameters of microclimate systems for livestock facilities.

**Keywords:** air velocity, angle of expansion of the jet, jet, nozzle, spherical segment

УДК 631.22

### **Модель скорости движения воздуха в струе**

**Братишко В.В.**, д.т.н., с.н.с., Национальный научный центр «Институт механизации и электрификации сельского хозяйства» НААН Украины

#### **Аннотация**

**Цель.** Уточнение математической модели скорости движения среды в воздушной струе.

**Методы.** Теоретические положения элементарной математики и механики жидкостей и газов.

**Результаты.** На основе предположения, что воздушная струя по геометрической форме

представляет собой шаровой сектор, а местом расположения точек струи, равноудаленных от сопла в отдельный момент времени, является сферический сегмент, с применением принципа сохранения количества движения была уточнена математическая модель скорости движения среды в воздушной струе.

**Выводы.** В результате теоретических исследований получена в общем виде математическая модель скорости движения воздушной струи. Применение полученной модели, по сравнению с существующими, позволяет повысить точность расчетов движения воздушной среды в струе, например, при расчете параметров систем микроклимата животноводческих помещений.

**Ключевые слова:** угол расширения струи, сопло, струя, сферический сегмент, скорость воздуха

**Постановка проблеми.** Однією із важливих складових обґрунтування раціональних параметрів мікроклімату тваринницьких приміщень є моделювання руху повітряного середовища. Причому, застосування систем активної вентиляції, очищення, змішування, охолодження повітря тощо, передбачає аналіз руху повітряного середовища як деякої сукупності струменів. На жаль, існуючі моделі, що отримані шляхом аналізу емпіричних даних, мають декілька недоліків щодо характеру швидкості в зоні, близькій до сопла, точності розрахунку для швидкості струменя, меншій ніж 10% від початкової, тощо. Уточненню цих моделей і присвячена дана робота.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** З досліджень аеродинаміки повітряних потоків у приміщенні [1] відомо, що згідно з припущенням про відповідність швидкості руху струменя повітря нормальному розподілові, вона може бути записана емпіричною залежністю виду:

$$V = V_l e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{r}{cl} \right)^2}, \quad (1)$$

де  $V$  – швидкість руху повітря в довільній точці повітряного струменя з координатами  $r$  та  $l$  (рис. 1), м/с;

$V_l$  – швидкість руху повітря в центрі струменя на відстані  $l$  від патрубку, м/с;

$r$  – відстань від осі струменя, м;

$l$  – відстань від сопла до деякого нормального перетину струменя, м;

$c$  – експериментальна константа,  $c = 0,082$  за [1].

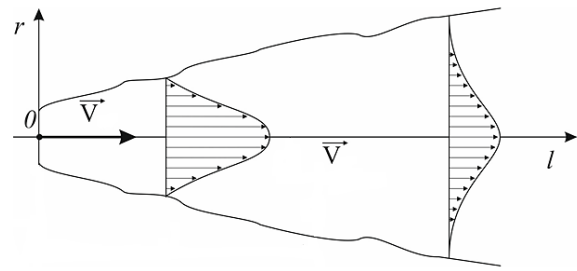


Рис. 1. Схема повітряного струменя

Fig. 1. Scheme of an air jet

А швидкість руху повітря в центрі струменя на відстані  $l$  від сопла знаходиться як [1]:

$$V_l = \frac{m_l V_0 \sqrt{S_0}}{l}, \quad (2)$$

де  $m_l$  – показник аеродинамічної характеристики струменя;

$V_0$  – початкова швидкість струменя, м/с;

$S_0$  – площа перетину сопла, м<sup>2</sup>.

Або – за емпіричною формулою Г. І. Абрамовича:

$$V_l = V_0 \frac{0,96}{\frac{al}{r_0} + 0,29}, \quad (3)$$

де  $a$  – експериментальна константа,  $a = 0,07-0,08$ ;

$r_0$  – радіус (еквівалентний радіус) сопла, м.

Причому, за даними [2], для прямокутних отворів зі співвідношенням сторін не більше 1:3 для розрахунків з достатньою точністю можна використовувати залежності для осесиметричного струменя, замінюючи прямокутний отвір сопла еквівалентним йому за площею круглим.

Однак практичне застосування залежностей (1)–(3) ускладнюється необхідністю знаходження емпіричних коефіцієнтів. Також, на нашу думку, наведені вирази можна записати в спосіб, який відповідатиме фізичному уявленню про процес руху газового середовища в струмені.

**Мета досліджень.** Уточнення математичної моделі швидкості руху середовища в повітряному струмені.

**Методи досліджень.** Під час виконання досліджень застосовувалися теоретичні

положення елементарної математики та механіки рідин і газів.

**Результати досліджень.** Під час виконання досліджень прийняті такі припущення: течія струменя є ізобаричною та ізотермічною; струмінь витікає вільно – обмежувальні поверхні відсутні; струмінь за геометричною формою являє собою кульовий сектор, а місцем розташування точок струменя, рівновіддалених від сопла в окремий момент часу, є сферичний сегмент [3].

Тоді, з урахуванням принципу збереження кількості руху та наведених припущень, для незмішаного повітряного струменя можемо записати:

$$V_0^2 \rho S_0^2 t = V_l^2 \rho S_l^2 t = const, \quad (4)$$

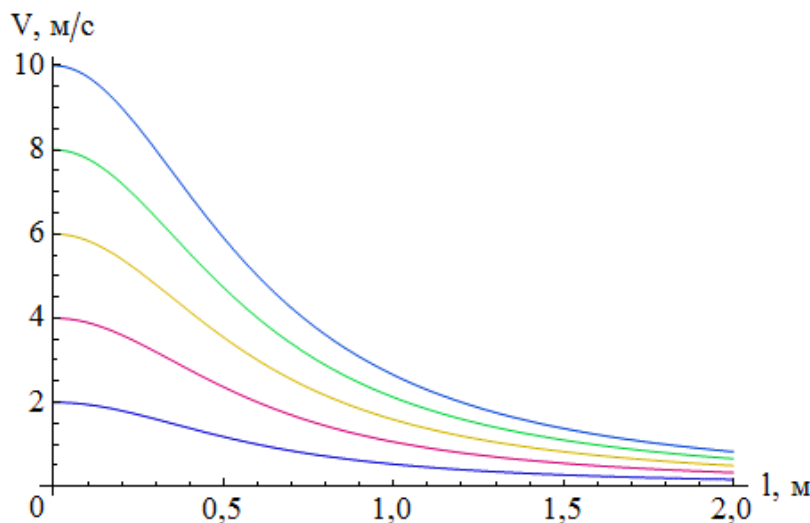
де  $\rho$  – густина, кг/м<sup>3</sup>;

$S_l$  – площа поверхні, що утворена точками струменя, віддаленими на відстань  $l$  від сопла (площа відповідного сферичного сегмента), м<sup>2</sup>;

$t$  – час, с.

На основі залежності (4) швидкість точок струменя, віддалених від сопла на деяку відстань  $l$  (рис. 2), запишеться як:

$$V_l = V_0 \frac{\pi r_0^2}{2\pi l^2 (1 - \cos \beta_0)}, \quad (5)$$

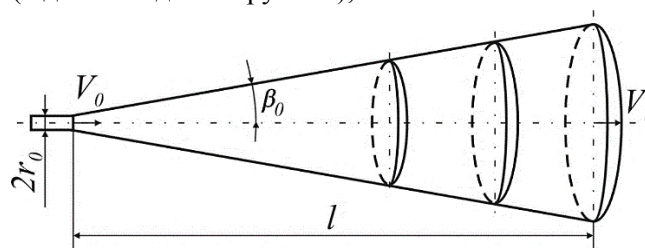


**Рис. 3.** Зміна швидкості руху повітря за довжиною струменя при  $V_0 = [2, 4, 6, 8, 10]$  м/с,  $r_0 = 0,03$  м,  $\beta_0 = 0,05$  рад

**Fig. 3.** Changing the velocity of air along the length of the jet at  $V_0 = [2, 4, 6, 8, 10]$  m/s,  $r_0 = 0,03$  m,  $\beta_0 = 0,05$  rad

де  $\beta_0$  – кут розширення струменя, рад,  $\beta_0 = \arctg (r/l)$ ;

$r$  – радіус струменя на відстані  $l$  від сопла (відстань від осі струменя), м.



**Рис. 2.** Схема повітряного струменя  
**Fig. 2.** Scheme of an air jet

Враховавши початкові умови руху струменя (при  $l = 0$ ,  $V_l = V_0$ ), запишемо остаточний вираз швидкості  $V_l$ :

$$V_l = V_0 \frac{r_0^2}{2l^2 (1 - \cos \beta_0) + r_0^2}. \quad (6)$$

Графічне відображення залежності (6) наведено на рисунку 3.

Як видно, характер отриманої залежності (6) на відміну від відомої залежності (2) відповідає даним про зміну швидкості струменя на початковій ( $l < 8 r_0$ ) та перехідній ( $8 r_0 < l < 16 r_0$ ) ділянці струменя, наведеним, наприклад, у роботі [4].

Проте відомо [2, 4 та ін.], що рух повітря у струмені має ламінарний характер тільки на його початку, поступово змінюючись на турбулентний зі створенням вихорів, що веде до обміну масами між струменем та повітряним середовищем, унаслідок чого збільшуються розміри струменя та його маса. Також є загальноприйнятим, що для основної ділянки струменя ( $l > 16 r_0$ ) поперечний профіль швидкості руху має форму функції Гауса (1).

Отже, застосування виразу (6) для розрахунку параметрів затопленого струменя, наприклад, швидкості руху повітря в тваринницькому приміщенні, потребує врахування частки повітря, захопленого струменем. Очевидно, що за умов ізотропного середовища зміна розмірів струменя відбуватиметься

завдяки зміні кута  $\beta_0$  залежності (6), що набуде вигляду:

$$V_l = V_0 \frac{r_0^2}{2l^2 (1 - \cos(f[\beta_0])) + r_0^2}, \quad (7)$$

де  $f[\beta_0]$  – деяка функція, що враховує співвідношення кута розширення затопленого та незатопленого струменів.

Загальновідомо, що кут розширення вільного круглого струменя становить 9–12 градусів. Сумісний аналіз залежностей (2), (3) та (7) дозволив встановити, що для  $\beta_0 \in [0,05; 0,4]$   $f[\beta_0] = \text{const} \approx 0,04$ , а отже, можемо записати:

$$V_l = V_0 \frac{r_0^2}{bl^2 + r_0^2}, \quad (8)$$

де  $b$  – деякий коефіцієнт,  $b \approx 0,0016$ .

Порівняння графіків залежностей (2), (3) та (8) наведено на рисунку 4.

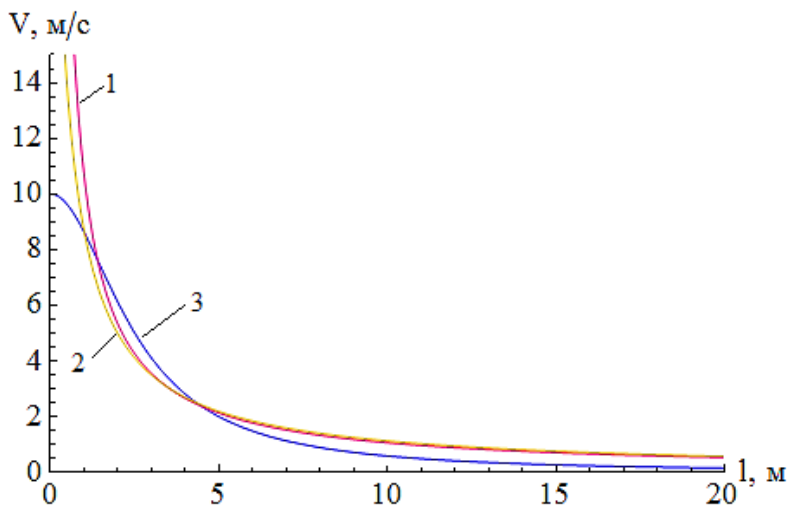


Рис. 4. Швидкість руху повітря за довжиною струменя:

1 – графік залежності (2), 2 – графік залежності (3), 3 – графік залежності (8)

Fig. 4. Velocity of air along the length of the jet:

1 – plot of formula (2), 2 – plot of formula (3), 3 – plot of formula (8)

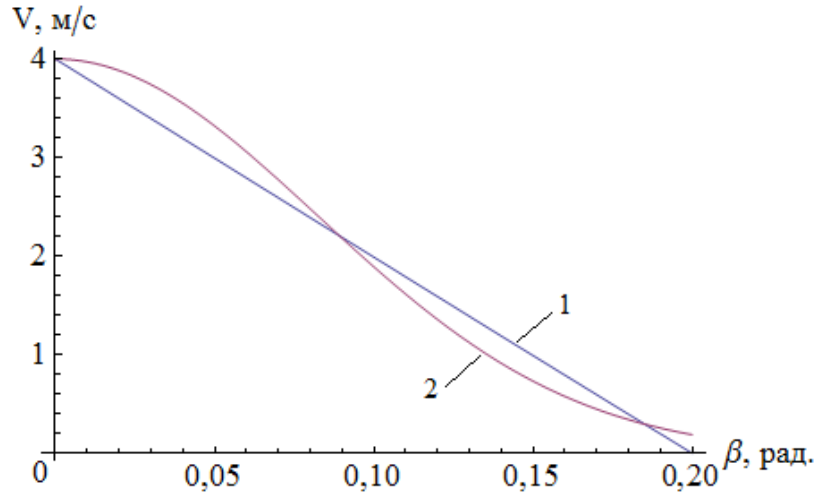
Як видно з рисунку 4, залежність (8), на відміну від (2) та (3), дозволяє отримати коректні значення швидкості руху повітря в струмені як у близькості до сопла, так і для швидкості струменя, меншій ніж 10% від початкової, де, розрахована за виразами (2) та (3), швидкість руху повітря перевищує дійсну.

Так само на основі прийнятих припущень швидкість струменя в точках, які належать відповідному сферичному сегменту, що знаходиться на відстані  $l$  від джерела струменя, змінюючись від  $V_l$  до 0 під час віддалення від осі струменя до його периферії, можна записати як:

$$V_{l\beta} = V_l \left( 1 - \frac{\sin \beta}{\sin \beta_0} \right), \quad (9)$$

де  $\beta$  – кут між точкою струменя та його віссю, рад.,  $\beta \in [0; \beta_0]$ .

Графічне порівняння залежностей (1) та (9) наведено на рисунку 5.



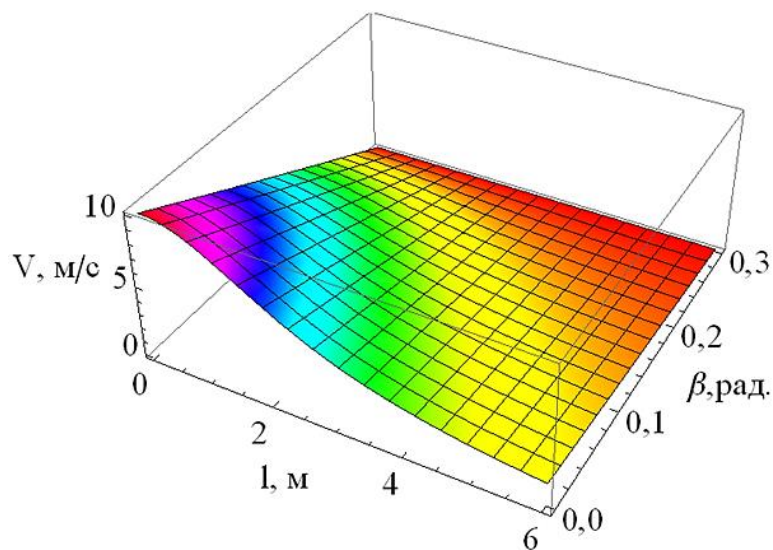
**Рис. 5.** Швидкість руху повітря в струмені:  
1 – графік залежності (9), 2 – графік залежності (1)

**Fig. 5.** Velocity of movement of air in a jet:  
1 – plot of formula (9), 2 – plot of formula (1)

Як видно з рисунку 5, лінія, що побудована за пропонованою залежністю (9), відповідає уявленню про фізичний зміст розподілу швидкостей середовища в струмені. Отже, в загальному вигляді вираз для визначення швидкості руху середовища в будь-якій точці струменя запишеться так:

$$V_{l\beta} = V_0 \frac{r_0^2}{bl^2 + r_0^2} \left( 1 - \frac{\sin \beta}{\sin \beta_0} \right). \quad (10)$$

Графічна інтерпретація залежності (10) наведена на рисунку 6.



**Рис. 6.** Швидкість руху повітря в струмені  
**Fig. 6.** Velocity of movement of air in a jet

Як видно з рисунку 6, характер отриманої залежності повністю відповідає уявленням про розподіл швидкості повітряного середовища в струмені.

### Висновки

У результаті теоретичних досліджень отримано в загальному вигляді математичну модель швидкості руху повітряного струменя. Застосування запропонованої моделі, порівнюючи з існуючими, дає змогу підвищити точність розрахунків руху повітряного середовища в струмені, наприклад, під час розрахунку параметрів систем мікроклімату тваринницьких приміщень.

### Бібліографія

1. Шепелев И. А. Аэродинамика воздушных потоков в помещении. М.: Стройиздат, 1978. 144 с.
2. Максимов Г. А., Дерюгин В. В. Движение воздуха при работе систем вентиляции и отопления. Л.: Сройиздат, 1972. 99 с.
3. Маркушевич А. И., Хинчин А. Я., Александров П. С. Энциклопедия элементарной математики. Геометрия. М.: ГИФМЛ, 1963. 568 с.
4. Волков К. Н., Емельянов В. Н., Зазимко В. А. Турбулентные струи – статистические модели и моделирование крупных вихрей. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2014. 360 с.

### Bibliohrafiia

1. Shepelev I. A. Aerodinamika vozdushnyih potokov v pomeschenii. M.: Sroyizdat, 1978. 144 s.
2. Maksimov G. A., Deryugin V. V. Dvizhenie vozduha pri rabote sistem ventilyatsii i otopleniya. L.: Sroyizdat, 1972. 99 s.
3. Markushevich A. I., Hinchin A. Ya., Aleksandrov P. S. Entsiklopediya elementarnoy matematiki. Geometriya. M.: GIFML, 1963. 568 s.
4. Volkov K. N., Emelyanov V. N., Zazimko V. A. Turbulentnyie strui – statisticheskie modeli i modelirovanie krupnyih vihrey. M.: FIZMATLIT, 2014. 360 s.

### Bibliography

1. Shepelev I. A. Aerodynamics of air flows in the indoors. M.: Stroiizdat, 1978. 144 p.
2. Maksimov G. A., Deryugin V. V. Air movement during operation of ventilation and heating systems. L.: Sroyizdat, 1972. 99 c.
3. Markushevich A. I., Hinchin A. Ya., Aleksandrov P. S. Encyclopedia of elementary mathematics. Geometry. M.: GIFML, 1963. 568 p.
4. Volkov K. N., Emelyanov V. N., Zazimko V. A. Turbulent jets. Statistical models and modeling of large eddies. M.: FIZMATLIT, 2014. 360 p.