

*Толкунов И.А., ст. преп., НУГЗУ,  
Попов И.И., канд. техн. наук, доц., НУГЗУ,  
Барбашин В.В., канд. техн. наук, нач. каф., НУГЗУ*

## **ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПЕРЕНОСА АЭРОИОНОВ В ПОТОКАХ ВОЗДУХА В ПОМЕЩЕНИЯХ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ МЧС УКРАИНЫ**

(представлено д-ром техн. наук Куценко Л.Н.)

На основе аэродинамических расчетов распределения воздуха в помещениях специального назначения МЧС Украины, проведено теоретическое исследование распространения аэроионов в потоках ионизированного воздуха и предложена математическая модель, описывающая эти процессы

**Ключевые слова:** аэроион, аэроионизация, коронный аэроионизатор, нормативный аэроионный режим, искусственная ионизация воздуха, управляемый генератор аэроионов, помещение специального назначения МЧС Украины

**Постановка проблемы.** В соответствии со спецификой помещений специального назначения МЧС Украины (ПСН), их отличительной особенностью является небольшая площадь при относительно малой высоте, стесненная компоновка оборудования, а также специфическая форма операторской деятельности в них. Реализация методов искусственной аэроионизации в таких помещениях требует знания конкретных данных о распределении концентраций аэроионов в воздушной среде обитания при определенных способах организации воздухообмена, получение которых экспериментальным путем связано со значительными трудностями, а теоретическая задача о распределении аэроионов в воздушной среде вентилируемых помещений в настоящее время требует решения в форме, удобной для практических приложений [1].

**Анализ последних исследований и публикаций.** Анализ способов нормализации ионного состава воздушной среды показывает, что нормативный аэроионный режим в ПСН наиболее эффективным образом может быть реализован путем подачи в помещение искусственно ионизированного воздуха с помощью стационарных коронных аэроионизаторов, встроенных в систему

жизнеобеспечения, как наиболее совершенного варианта в медико-техническом и экономическом отношении [2,3].

В этом случае аэроионный режим зависит от организации воздухообмена и в значительной степени определяется способом распределения воздуха в помещении, а расчеты по определению концентрации аэроионов в рабочей зоне ведутся с учетом свойств и закономерностей приточных струй для условий их прямого воздействия [4]. В то же время, закономерности процесса ионобразования и создания нормативного аэроионного режима воздушной среды ПСН требует дальнейшего исследования [5].

**Постановка задачи и ее решение.** В аэродинамическом отношении состояние воздушной среды в ПСН является турбулентным, так как воздух подается в помещения приточными струями, для которых критическое число Рейнольдса приблизительно на два порядка выше, чем для ламинарных потоков в трубах и каналах.

В связи с этим, целью данного исследования является математическое моделирование процессов турбулентного переноса аэроионов в потоках воздуха в помещениях специального назначения МЧС Украины.

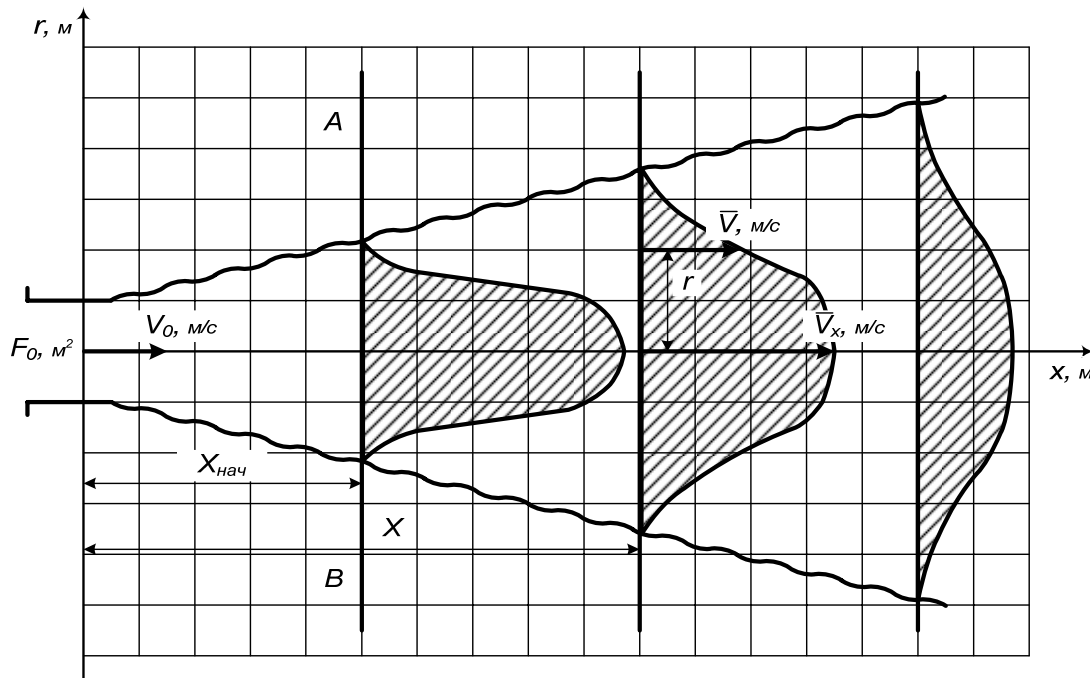


Рис. – Схема приточной турбулентной струи

Приточные струи, с достаточной для инженерных расчетов точностью, можно представить состоящими из двух участков (рис.): начального, протяженностью  $x_{\text{нач}}$ , и основного. Сечение АВ называют переходным сечением. В поперечных сечениях струи устанавливаются также характерные профили избыточных температур и концентраций, которые в условиях свободной турбулентности подобны между собой, но не подобны профилю скоростей. Формулы для расчета начального и основного участка различны [6].

Используя схему, приведенную на рис., установим основные закономерности распределения концентрации аэроионов в приточной струе. Введем цилиндрические координаты с началом в центре приточного отверстия, направив ось  $x$  по оси струи, а радиус – нормально к ней.

В основу теоретического исследования положены следующие допущения [7]:

1) Экспериментально установлено, что давление в струе практически неизменно и равно давлению в окружающем пространстве. Поэтому условие сохранения количества движения секундной массы воздуха в струе можно записать следующим образом

$$\int_0^{F_0} \rho_0 V_0^2 dF = \int_0^{\infty} \rho V^2 dF, \quad (1)$$

где  $V$  – скорость движения воздуха в произвольной точке струи, заданной координатами  $x$  и  $r$ , м/с;  $V_0$  – скорость истечения приточного воздуха, м/с;  $\rho$  – массовая плотность воздуха в произвольной точке струи, кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_0$  – массовая плотность истекающего воздуха, кг/м<sup>3</sup>;  $F_0$  – площадь приточного отверстия, м<sup>2</sup>;  $dF$  – элементарная площадь поперечного сечения струи, в пределах которой скорость одинакова, м<sup>2</sup>.

Для изотермических условий истечения струи можно считать, что

$$\rho = \rho_0 = \rho_{\infty}, \quad (2)$$

где  $\rho_{\infty}$  – массовая плотность окружающего воздуха, кг/м<sup>3</sup>.

2) На основаниі полумпірических теорій о характере турбулентного движения запишем функцию, характеризующую профиль скоростей в зоне турбулентного перемешивания струи, в следующем виде

$$V = V_x \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{r}{c \cdot x} \right)^2 \right], \quad (3)$$

где  $V_x$  – скорость движения воздуха в центре произвольного поперечного сечения струи, м/с;  $c$  – экспериментальная постоянная, вероятное значение которой равно 0,082.

В пределах начального участка

$$V_x = V_0. \quad (4)$$

3) На основании подобия процессов переноса тепла и примесей в приточных струях распределение избыточной концентрации аэроионов в поперечных сечениях струи запишем в виде

$$\Delta N^\pm = \Delta N_x^\pm \exp \left[ -\frac{\sigma}{2} \left( \frac{r}{c \cdot x} \right)^2 \right], \quad (5)$$

где  $\Delta N^\pm$  и  $\Delta N_x^\pm$  – избыточные концентрации аэроионов положительной (верхний знак «+») и отрицательной (нижний знак «-») полярности в произвольной точке струи, заданной координатами  $x$  и  $r$ , и на оси струи, соответственно, м<sup>-3</sup>, которые определяются из соотношений

$$\Delta N_x^\pm = (n_x^\pm + N_x^\pm) - (n_\infty^\pm + N_\infty^\pm), \quad (6)$$

$$\Delta N^\pm = (n^\pm + N^\pm) - (n_\infty^\pm + N_\infty^\pm); \quad (7)$$

$n^\pm$ ,  $n_x^\pm$ ,  $n_\infty^\pm$  – концентрации легких положительных и отрицательных аэроионов в произвольной точке, на оси и в окружающей среде соответственно, м<sup>-3</sup>;  $N^\pm$ ,  $N_x^\pm$ ,  $N_\infty^\pm$  – концентрации тяжелых положительных и отрицательных аэроионов в произвольной точке,

на оси и в окружающей среде соответственно,  $m^{-3}$ ;  $\sigma$  – экспериментальная постоянная, вероятное значение которой равно 0,8.

В дальнейшем полагаем, что воздух окружающей среды деионизирован ( $N_{\infty}^{\pm} = n_{\infty}^{\pm} = 0$ ) и концентрации тяжелых аэроионов пренебрежимо малы ( $N^{\pm} \approx 0$ ). Для этого случая из (5)...(7) имеем

$$\Delta N_x^{\pm} = n_x^{\pm}, \quad \Delta N^{\pm} = n^{\pm}.$$

Тогда

$$n^{\pm} = n_x^{\pm} \exp \left[ -\frac{\sigma}{2} \left( \frac{r}{c \cdot x} \right)^2 \right]. \quad (8)$$

Решение задачи о распределении аэроионов в объеме помещений специального назначения возможно лишь после того, как станут известны изменения концентрации аэроионов вдоль струи приточного воздуха и в её поперечных сечениях. Эти закономерности можно установить с помощью закона сохранения избыточного электрического заряда в струе.

Так, при движении ионизированного воздуха изменение концентрации аэроионов происходит в результате эффектов электростатического рассеивания, рекомбинации, диффузии, прилипания к аэрозольным частицам. При этом основной вклад в потери аэроионов вносят эффекты рекомбинации и электростатического рассеивания [8]. С учетом этого, распределение избыточной концентрации легких аэроионов отрицательной и положительной полярности в струе для случая  $n_0^- > n_0^+$  описывается системой уравнений

$$\begin{cases} \int_0^{F_0} \rho_0 V_0^2 dF = \int_0^{\infty} \rho V^2 dF, \\ \int_0^{F_0} n_0^- V_0 dF = \int_0^{\infty} n^- V dF + \int_0^x dx \int_0^{\infty} \left[ \alpha n^- n^+ + \frac{qk^- n^-}{\varepsilon \varepsilon_0} (n^- - n^+) \right] dF, \\ \int_0^{F_0} n_0^+ V_0 dF = \int_0^{\infty} n^+ V dF + \int_0^x dx \int_0^{\infty} \alpha n^- n^+ dF, \end{cases} \quad (9)$$

где  $n_0^+$  – избыточная концентрация лёгких положительных и отрицательных аэроионов в начале истечения,  $\text{м}^{-3}$ ;  $k^\pm$  – электрическая подвижность положительных (верхний знак «+») и отрицательных (нижний знак «-») лёгких аэроионов,  $\text{м}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$ ;  $q$  – элементарный заряд, Кл;  $\alpha$  – коэффициент рекомбинации лёгких аэроионов;  $\varepsilon$  – относительная диэлектрическая постоянная воздуха, Ф/м;  $\varepsilon_0$  – электрическая постоянная, Ф/м.

Считая избыточную концентрацию лёгких аэроионов не зависящей от радиальной координаты  $r$  и пренебрегая уширением струи, систему (9) в пределах начального участка ( $0 < x \leq x_{нач}$ ) с учетом (4) можно представить в виде

$$\begin{cases} V_x = V_0, \\ \frac{dn^-}{dx} V_0 = -\alpha n^- n^+ - \beta n^- (n^- - n^+), \\ \frac{dn^+}{dx} V_0 = -\alpha n^- n^+, \end{cases} \quad (10)$$

где  $\beta = \frac{qk^-}{\varepsilon\varepsilon_0}$ .

Решая систему (10) с начальными условиями:

$$n_0^- = n^- \text{ и } n_0^+ = n^+ \text{ при } x = 0, \quad (11)$$

получаем уравнение для определения избыточной концентрации лёгких положительных аэроионов

$$\frac{dn^+}{dx} V_0 = -\alpha \left( \frac{1 - K_y}{K_y} \right) (n_0^+)^{1-\beta/\alpha} (n^+)^{1+\beta/\alpha} - \alpha (n^+)^2, \quad (12)$$

где  $K_y$  – коэффициент униполярности лёгких аэроионов,  $K_y = \frac{n_0^+}{n_0^-}$ .

С учетом (10) и (12) расчетная формула для определения избыточной концентрации лёгких отрицательных аэроионов имеет вид

$$n^- = n^+ \left[ 1 - \frac{1 - K_y}{K_y} \left( \frac{n^+}{n_0^+} \right)^{\beta/\alpha - 1} \right]. \quad (13)$$

Решением уравнения (12) являются быстро сходящиеся ряды, которые в частных случаях свертываются в элементарные функции.

В случае биполярной ионизации, когда можно не учитывать влияние электростатического рассеивания ( $\beta = 0$ ), для избыточных концентраций легких положительных и отрицательных аэроионов получены следующие зависимости

$$n^+ = \frac{\Delta n_0}{\frac{1}{K_y} \exp\left(\alpha \Delta n_0 \frac{x}{V_0}\right) - 1} \quad (14)$$

и

$$n^- = \frac{\Delta n_0}{1 - K_y \exp\left(-\alpha \Delta n_0 \frac{x}{V_0}\right)}, \quad (15)$$

где  $\Delta n_0 = n_0^+ - n_0^-$ .

А в случае униполярной аэроионизации, если все аэроионы имеют одинаковую подвижность  $k$ , то изменение их избыточной концентрации в пределах начального участка струи описывается соотношением

$$n^\pm = \frac{n_0^\pm}{1 + \frac{qk^\pm}{\varepsilon\varepsilon_0} n_0^\pm \frac{x}{V_0}}. \quad (16)$$

В общем случае влияние электростатического рассеивания на характер изменения избыточной концентрации аэроионов во времени и пространстве следует рассматривать с учетом спектральной функции её распределения по подвижностям

$$n^{\pm}(k^{\pm}) = \lim_{\Delta k^{\pm} \rightarrow 0} \frac{n^{\pm}(k^{\pm}, k^{\pm} + \Delta k^{\pm})}{\Delta k^{\pm}}. \quad (17)$$

Такой подход значительно усложняет задачу. Для практических расчетов целесообразно использовать среднее значение подвижности групп аэроионов, соответствующее условной стандартной подвижности лёгких аэроионов  $k_{st}$ , ( $k_{st} = 1,77 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$ ).

**Выводы.** На основе аэродинамических расчетов распространения потоков ионизированного воздуха и закона сохранения электрического заряда предложена математическая модель, описывающая процессы распределения аэроионов в помещениях специального назначения при различных способах организации воздухообмена.

Получены аналитические соотношения, определяющие распределение избыточной концентрации отрицательных и положительных аэроионов в пределах начального участка приточной струи, которые могут быть использованы в случае больших размеров приточных отверстий, расположенных на достаточно близком расстоянии от рабочей зоны.

Необходимы комплексные исследования процессов формирования полей концентраций аэроионов в ПСН с учетом закономерностей основного участка приточной струи, а также инженерная интерпретация результатов этих исследований в форме, удобной для практического использования.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Толкунов І.О. Деякі аспекти забезпечення нормативного аероіонного режиму робочого середовища приміщень спеціального призначення МНС України / І.О. Толкунов, В.В. Маринюк, І.І. Попов, В.В. Пономар // Проблеми надзвичайних ситуацій. – Х.: УЦЗУ, 2008. – №8. – С.198-206.
2. Возмилов А.Г. Ионный вентилятор-фильтр для очистки воздуха в малообъемных помещениях / А.Г. Возмилов, В.Б. Файн, Е.В. Смирнягин // Техника в сельском хозяйстве. – 2003. – №5. – С.30-32.
3. Сторчевой В.Ф. Ионизация и озонирование в птицеводстве: дис. ... доктора техн. наук: 05.20.02 / Сторчевой Владимир Федорович. – М.: РГБ. 2003. – 283 с.



4. Бахарев В.А., Троеновский В.Н. Основы проектирования и расчёта вентиляции с сосредоточенным выпуском воздуха / В.А. Бахарев, В.Н. Троеновский. – М.: Профиздат, 1968. – 145 с.
5. Толкунов И.А. Исследование и разработка управляемых генераторов аэроионов для помещений специального назначения МЧС Украины / И.А. Толкунов, И.И. Попов, В.В. Барбашин // Проблемы надзвичайних ситуацій. – Х.: УЦЗУ, 2009. – №10. – С.186-194.
6. Абрамович Г.Н. Теория турбулентных струй / Генрих Наумович Абрамович. – М.: Физматгиз, 1960. – 715 с.
7. Шепелев И.А. Аэродинамика воздушных потоков в помещении / Израэль Абрамович Шепелев. – М.: Стройиздат, 1978. – 145 с.
8. Монтик П.Н. Совместное влияние рекомбинации и электростатического рассеивания на параметры ионизированного воздуха при его транспортировании / П.Н. Монтик, В.И. Лашманов В.И. // Электрическая обработка материалов. – 1978. – № 2. – С.56-63.

Толкунов І.О., Попов І.І., Барбашин В.В.

**Теоретичне дослідження процесів переносу аероіонів в потоках повітря в приміщеннях спеціального призначення МНС України**

На основі аеродинамічних розрахунків розподілу повітря в приміщеннях спеціального призначення МНС України, проведено теоретичне дослідження розповсюдження аероіонів в потоках іонізованого повітря та запропонована математична модель, яка описує ці процеси

**Ключові слова:** аероіон, аероіонізація, коронний аероіонізатор, нормативний аероіонний режим, штучна іонізація повітря, управляємий генератор аероіонів, приміщення спеціального призначення МНС України

Tolkunov I.A., Popov I.I., Barbashin V.V.

**Theoretical research of processes of transfer of aeroions in blasts in the apartments of the special setting of Ministry of emergency measures of Ukraine**

On the basis of aerodynamic calculations of distributing of air in the apartments of the special setting of Ministry of emergency measures of Ukraine, theoretical research of distribution of aeroions is conducted in the streams of the ionized air and a mathematical model, describing these processes

**Key words:** aeroion, aeroionization, corona aeroionizer, normative aeroionic mode, artificial ionization of air, guided generator of aeroions, apartment of the special setting Ministry of emergency measures of Ukraine