

УДК 656.7.052:656.7.08(045)

656.058.0203

Г.Г. Косенко, Д.А. Корчунов

## ВЛИЯНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ВОЗДУШНОГО ДВИЖЕНИЯ НА ПОКАЗАТЕЛИ БЕЗОПАСНОСТИ

*Рассмотрены проблемы, связанные с переходом к сокращенному вертикальному эшелонированию (RVSM) в регионах Северная Атлантика и Континентальная Европа. На основе анализа влияния загрузки, числа продольных перекрытий и средней скорости воздушного судна на показатели безопасности даны рекомендации относительно выдерживания и варьирования данными характеристиками в условиях RVSM.*

Постоянное увеличение интенсивности воздушного движения повлекло за собой уплотнение в вертикальном эшелонировании. В частности, градация 600 м была уменьшена до 300 м. Это, в свою очередь, сказалось на вероятности катастроф при вертикальном разделении. Так, требуемый ICAO уровень безопасности (вероятность катастроф) равен  $2 \cdot 10^{-8}$ . При уменьшении градации вертикального эшелонирования до 300 м уровень безопасности полетов понизился для Континентальной Европы до  $P_z(1000 \text{ фут}) = 6,6 \cdot 10^{-6}$ , для Северной Атлантики – до  $P_z(1000 \text{ фут}) = 3,22 \cdot 10^{-7}$ , т.е. фактически на два порядка.

Влияние различных параметров воздушного движения на ожидаемое число аварий на полетный час воздушного судна (ВС) вследствие нарушений вертикального разделения рассмотрим на примере модели риска столкновений для одиночной воздушной трассы. Система воздушной трассы состоит из одиночной воздушной трассы, на которой некоторые пары прилегающих эшелонов полета могут иметь поток в одном направлении, на других эшелонах – в противоположных направлениях. Двумя экстремальными случаями, безусловно, будут случаи, когда весь поток ВС летит в одном направлении или каждая пара прилегающих эшелонов полета содержит потоки в противоположных направлениях.

Классическая "загрузочная" модель для этих ситуаций выглядит следующим образом [1]:

$$N_{az} = P_z(\text{std})P_y(0) \frac{\lambda_x}{S_x} \left[ E_z(\text{same}) \left( \frac{|\Delta \bar{V}|}{2\lambda_x} + \frac{|\bar{y}|}{2\lambda_y} + \frac{|\bar{z}|}{2\lambda_z} \right) + E_z(\text{opp}) \left( \frac{\bar{V}}{\lambda_x} + \frac{|\bar{y}|}{2\lambda_y} + \frac{|\bar{z}|}{2\lambda_z} \right) \right], \quad (1)$$

где  $N_{az}$  – ожидаемое число аварий на полетный час ВС в системе вследствие нарушений вертикального разделения;  $P_z(\text{std})$  – вероятность вертикального перекрытия;  $P_y(0)$  – вероятность бокового перекрытия;  $S_x$  – критерий близости вдоль трассы;  $E_z(\text{same})$  – односторонняя загрузка;  $|\Delta \bar{V}|$  – среднее абсолютное значение относительной скорости между двумя ВС на односторонних трассах;  $|\bar{y}|$  – среднее абсолютное значение боковой скорости между двумя ВС на той же трассе;  $|\bar{z}|$  – среднее абсолютное значение боковой скорости между двумя ВС на тех же или пересекающихся трассах;  $\lambda_x$ ,  $\lambda_y$ ,  $\lambda_z$  – средние длина, ширина и высота ВС;  $E_z(\text{opp})$  – двухсторонняя загрузка;  $\bar{V}$  – средняя скорость.

Без особенных изменений модели риска столкновений уравнение (1) может быть выражено различным образом объединением одного или нескольких параметров в один новый параметр. Это выгодно применено к произведению трех переменных  $\frac{\lambda_x}{S_x}$ ,  $E_z(\text{same})$ ,

$\frac{|\Delta V|}{2\lambda_x}$  и подобным образом ко второй части модели. Таким образом, альтернативное описание модели риска столкновений выражается через "проходящую" модель [1]:

$$N_{az} = P_z(\text{std})P_y(0) \left[ N_x(\text{same}) \left( 1 + \frac{2\lambda_x}{|\Delta V|} \left( \frac{|\dot{y}|}{2\lambda_y} + \frac{|\dot{z}|}{2\lambda_z} \right) \right) + N_x(\text{opp}) \left( 1 + \frac{\lambda_x}{V} \left( \frac{|\dot{y}|}{2\lambda_y} + \frac{|\dot{z}|}{2\lambda_z} \right) \right) \right], \quad (2)$$

где  $N_x(\text{same})$  – ожидаемое число продольных перекрытий (проходящих событий), случающихся со средним ВС за полетный час, в одностороннем движении на прилегающих эшелонах полета;  $N_x(\text{opp})$  – ожидаемое число продольных перекрытий (проходящих событий), случающихся со средним ВС за полетный час, в двухстороннем движении на прилегающих эшелонах полета.

Рассмотрим, как будет изменяться ожидаемое число аварий на полетный час в системе вследствие нарушений вертикального разделения  $N_{az}$  в зависимости от односторонней  $E_z(\text{same})$  и двухсторонней  $E_z(\text{opp})$  загрузок, ожидаемого числа продольных перекрытий (проходящих событий), случающихся со средним ВС за полетный час в одностороннем движении на прилегающих эшелонах полета  $N_x(\text{same})$ , и ожидаемого числа продольных перекрытий (проходящих событий), случающихся со средним ВС за полетный час в двухстороннем движении на прилегающих эшелонах полета  $N_x(\text{opp})$ , средней скорости  $\bar{V}$  для Континентальной Европы и Северной Атлантики.

Зависимости ожидаемого числа аварий на полетный час в системе вследствие нарушений вертикального разделения  $N_{az}$  от односторонней загрузки  $E_z(\text{same})$  (прямая 2) и двухсторонней загрузки  $E_z(\text{opp})$  (прямая 1) показаны на рис. 1 для Северной Атлантики и на рис. 2 для Континентальной Европы.

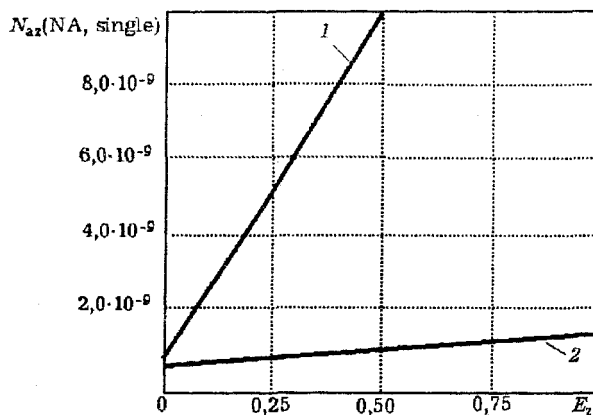


Рис. 1

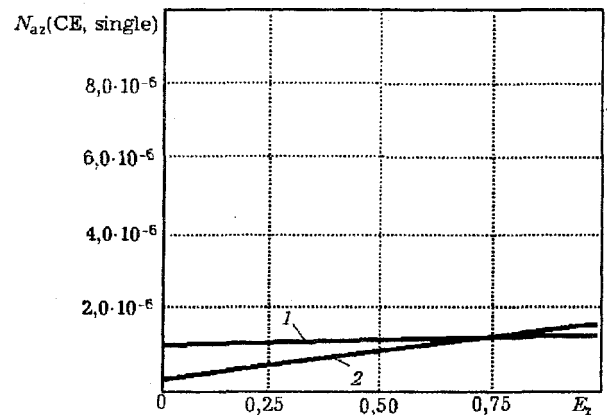


Рис. 2

Графики построены при следующих значениях параметров, входящих в модель риска столкновений (1) [1]:

– для Северной Атлантики:  $\lambda_x=0,034 \text{ NM}$ ,  $\lambda_y=0,030 \text{ NM}$ ,  $\lambda_z=0,010 \text{ NM}$ ,  $P_y(0)=0,0096$ ,  $V=480 \text{ kts}$ ,  $|\Delta V|=1 \text{ kts}$ ,  $|y|=20 \text{ kts}$ ,  $|z|=1,5 \text{ kts}$ ,  $E_z(\text{opp})=0,020$ ,  $E_z(\text{same})=0,648$ ,  $S_x=80 \text{ NM}$ ;

– для Континентальной Европы:  $\lambda_x=0,023 \text{ NM}$ ,  $\lambda_y=0,020 \text{ NM}$ ,  $\lambda_z=0,007 \text{ NM}$ ,  $P_y(0)=0,038$ ,  $V=450 \text{ kts}$ ,  $|\Delta V|=35 \text{ kts}$ ,  $|y|=12,5 \text{ kts}$ ,  $|z|=1,5 \text{ kts}$ .

В качестве вероятностей вертикального перекрытия выступали оценки вероятностей катастроф (для Северной Атлантики  $P_z(\text{std}) = P_z(1000 \text{ фут}) = 3,22 \cdot 10^{-7}$ , для Континентальной Европы  $P_z(\text{std}) = P_z(1000 \text{ фут}) = 6,6 \cdot 10^{-6}$ ). Для сравнения применительно к Континентальной Европе берем одностороннюю загрузку  $E_z(\text{same})$ , двухстороннюю загрузку  $E_z(\text{opp})$  и критерий близости вдоль трассы  $S_x$  такие же, как для Северной Атлантики. Поскольку

интенсивность воздушного движения для Континентальной Европы выше, чем для Северной Атлантики, то очевидно, что в действительности для Континентальной Европы односторонняя загрузка  $E_z(\text{same})$  и двухсторонняя загрузка  $E_z(\text{opp})$  будут больше, а критерий близости  $S_x$  меньше, чем для Северной Атлантики.

Из графиков видно, что и при таких малых нагрузках  $E_z$  для Континентальной Европы в этом регионе ожидаемое число аварий на полетный час в системе вследствие нарушений вертикального разделения  $N_{az}$  значительно превышает аналогичный показатель безопасности полетов для Северной Атлантики (приблизительно на три порядка при тех же односторонней загрузке  $E_z(\text{same})$  и двухсторонней загрузке  $E_z(\text{opp})$ ). Из графиков также видно, что зависимости ведут себя сравнительно одинаково.

Влияние односторонней загрузки  $E_z(\text{same})$  на ожидаемое число аварий на полетный час в системе вследствие нарушений вертикального разделения  $N_{az}$  (см. рис. 1, прямая 2 и рис. 2, прямая 1) очень мало по сравнению с влиянием двухсторонней загрузки  $E_z(\text{opp})$  на ожидаемое число аварий на полетный час в системе вследствие нарушений вертикального разделения  $N_{az}$  (см. рис. 1, прямая 1 и рис. 2, прямая 2). Такой вывод можно сделать исходя из того, что угол наклона прямой 1 к оси  $E_z$  (рис. 1) больше, чем угол наклона прямой 2 к оси  $E_z$  (рис. 1), а угол наклона прямой 1 к оси  $E_z$  (рис. 2) больше, чем угол наклона прямой 2 к оси  $E_z$  (рис. 2).

Следовательно, для удержания (сохранения) уровня безопасности полетов в заданных пределах или для его повышения целесообразно увеличивать одностороннюю загрузку  $E_z(\text{same})$  и по возможности (если это допустимо) уменьшать двухстороннюю загрузку  $E_z(\text{opp})$ . Кроме того, для Континентальной Европы проблема загрузки стоит значительно острее, чем для Северной Атлантики.

Рассмотрим, как влияют ожидаемое число продольных перекрытий (проходящих событий), случающихся со средним ВС за полетный час, в одностороннем движении на прилегающих эшелонах полета  $N_x(\text{same})$  и ожидаемое число продольных перекрытий (проходящих событий), случающихся со средним ВС за полетный час, в двухстороннем движении на прилегающих эшелонах полета  $N_x(\text{opp})$  на ожидаемое число аварий на полетный час в системе вследствие нарушений вертикального разделения  $N_{az}$ .

Зависимости ожидаемого числа аварий на полетный час в системе вследствие нарушений вертикального разделения  $N_{az}$  от ожидаемого числа продольных перекрытий (проходящих событий), случающихся со средним ВС за полетный час, в одностороннем движении на прилегающих эшелонах полета  $N_x(\text{same})$  (прямая 1) и ожидаемого числа продольных перекрытий (проходящих событий), случающихся со средним ВС за полетный час, в двухстороннем движении на прилегающих эшелонах полета  $N_x(\text{opp})$  (прямая 2) показаны для Северной Атлантики на рис. 3, для Континентальной Европы на рис. 4.

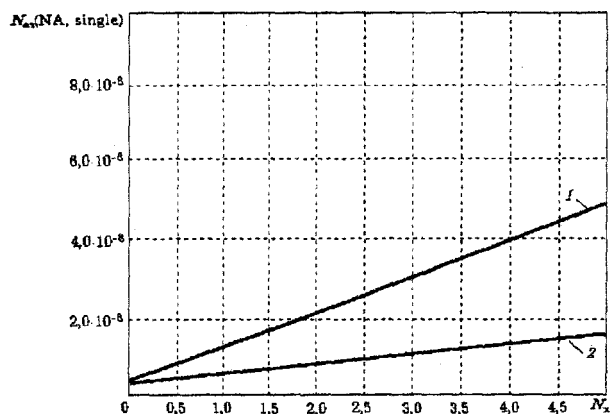


Рис. 3

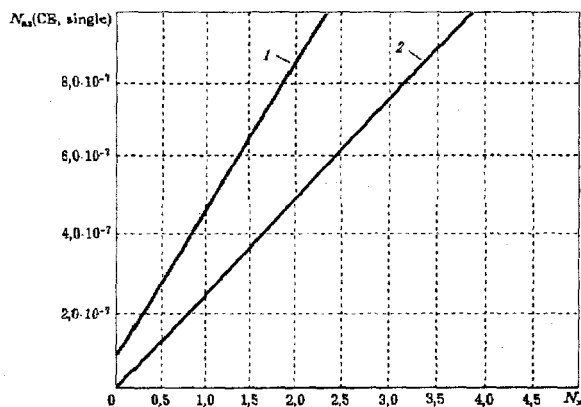


Рис. 4

Графики построены при следующих значениях параметров, входящих в модель риска столкновений (2) [1]: для Северной Атлантики  $N_x(\text{opp})=0,080 \text{ ч}^{-1}$ ,  $N_x(\text{same})=0,035 \text{ ч}^{-1}$ , для Континентальной Европы  $N_x(\text{opp})=0,340 \text{ ч}^{-1}$ ,  $N_x(\text{same})=0,034 \text{ ч}^{-1}$ . Все остальные параметры, входящие в рассматриваемую модель (2), равны аналогичным параметрам в "загрузочной" модели (1).

Из графиков видно, что для одних и тех же пределов ожидаемого числа продольных перекрытий (проходящих событий), случающихся со средним ВС за полетный час, в одностороннем движении на прилегающих эшелонах полета  $N_x(\text{same})$  и ожидаемого числа продольных перекрытий (проходящих событий), случающихся со средним ВС за полетный час, в двухстороннем движении на прилегающих эшелонах полета  $N_x(\text{opp})$  ожидаемое число аварий на полетный час в системе вследствие нарушений вертикального разделения  $N_{az}$  для Континентальной Европы на порядок больше, чем для Северной Атлантики.

Характер зависимостей одинаков, однако влияние ожидаемого числа продольных перекрытий (проходящих событий), случающихся со средним ВС за полетный час, в одностороннем движении на прилегающих эшелонах полета  $N_x(\text{same})$  и ожидаемого числа продольных перекрытий (проходящих событий), случающихся со средним ВС за полетный час, в двухстороннем движении на прилегающих эшелонах полета  $N_x(\text{opp})$  на ожидаемое число аварий на полетный час в системе вследствие нарушений вертикального разделения  $N_{az}$  для Континентальной Европы (рис. 4) значительно больше, чем влияние этих же характеристик на ожидаемое число аварий на полетный час в системе вследствие нарушений вертикального разделения  $N_{az}$  (см. рис. 3) для Северной Атлантики. Такой вывод можно сделать на основании того, что углы наклона прямых 1 и 2 к оси  $N_x$  на рис. 4 больше, чем углы наклона прямых 1 и 2 к оси  $N_x$  на рис. 3.

В обоих регионах влияние ожидаемого числа продольных перекрытий (проходящих событий), случающихся со средним ВС за полетный час, в одностороннем движении на прилегающих эшелонах полета  $N_x(\text{same})$  (рис. 3 и 4, прямая 1) более существенно, чем влияние ожидаемого числа продольных перекрытий (проходящих событий), случающихся со средним ВС за полетный час, в двухстороннем движении на прилегающих эшелонах полета  $N_x(\text{opp})$  (рис. 3 и 4, прямая 2). Следовательно, для удержания заданного уровня безопасности предпочтительнее уменьшать ожидаемое число продольных перекрытий (проходящих событий), случающихся со средним ВС за полетный час, в одностороннем движении на прилегающих эшелонах полета  $N_x(\text{same})$ .

Для Континентальной Европы проблема ожидаемого числа продольных перекрытий более актуальна, чем для Северной Атлантики, однако с точки зрения количественной оценки ожидаемого числа аварий на полетный час в системе вследствие нарушений вертикального разделения  $N_{az}$  она менее весома по сравнению с проблемой загрузки.

Рассмотрим влияние средней скорости  $\bar{V}$  на ожидаемое число аварий на полетный час в системе вследствие нарушений вертикального разделения  $N_{az}$ . Зависимости ожидаемого числа аварий на полетный час в системе вследствие нарушений вертикального разделения  $N_{az}$  от средней скорости  $\bar{V}$  для Северной Атлантики показаны на рис. 5, для Континентальной Европы на рис. 6.

Средняя скорость  $\bar{V}$  приведена в узлах (*kts*). Графики построены в соответствии с "проходящей" формой модели риска столкновений (2). Параметры, входящие в формулу модели (2), идентичны аналогичным приведенным параметрам.

Из графиков видно, что для одних и тех же пределов средней скорости  $\bar{V}$  ожидаемое число аварий на полетный час в системе вследствие нарушений вертикального разделения  $N_{az}$  для Континентальной Европы на два порядка превышает ожидаемое число аварий на полетный час в системе вследствие нарушений вертикального разделения  $N_{az}$  для Северной

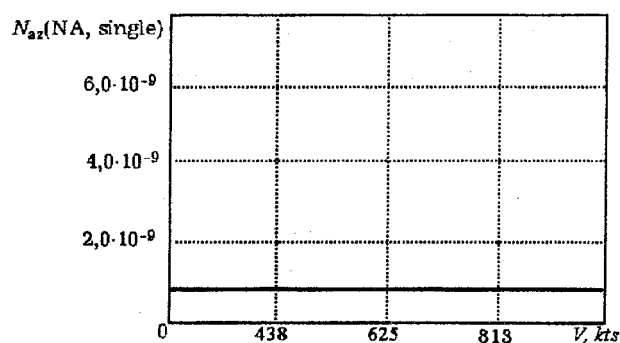


Рис. 5

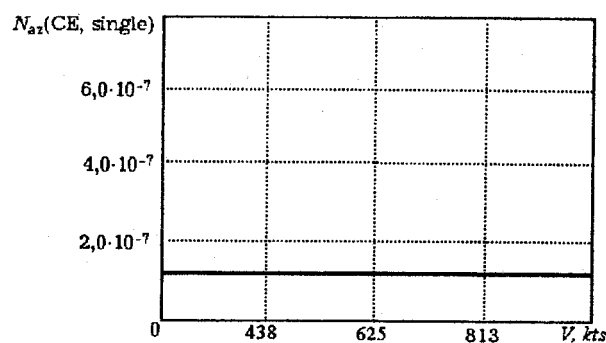


Рис. 6

Атлантики. Кроме того, явно видно, что ожидаемое число аварий на полетный час в системе вследствие нарушений вертикального разделения  $N_{az}$  в обоих регионах не зависит от изменения средней скорости  $\bar{V}$ , если рассматриваемая зависимость выражается через "проходящую" форму модели риска столкновений (2). График, показанный на рис. 7, построен в соответствии с "загрузочной" формой модели риска столкновений (1) и выражает зависимость ожидаемого числа аварий на полетный час в системе вследствие нарушений вертикального разделения  $N_{az}$  от средней скорости  $\bar{V}$  для Северной Атлантики.

Параметры, входящие в рассматриваемую модель (1), равны указанным параметрам для "загрузочной" формы модели (1). Если выразить рассматриваемую зависимость через "загрузочную" форму (1), то нетрудно увидеть (рис. 7) очень слабую зависимость ожидаемого числа аварий на полетный час в системе вследствие нарушений вертикального разделения  $N_{az}$  от средней скорости  $\bar{V}$ . Ожидаемое число аварий на полетный час в системе вследствие нарушений вертикального разделения  $N_{az}$

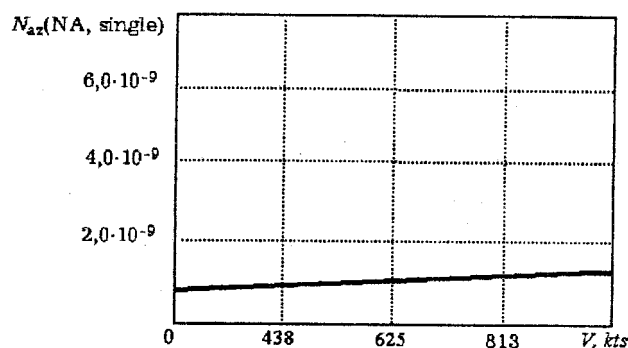


Рис. 7

практически остается постоянной величиной при изменении средней скорости  $\bar{V}$ . Следовательно, увеличение средней скорости  $\bar{V}$  не повлечет за собой изменения уровня безопасности.

Предложенное ICAO число  $2,5 \cdot 10^{-9}$  катастроф на полетный час должно быть избрано для дальнейших исследований разделений. На нынешнем уровне мировой авиационной активности это будет соответствовать одной катастрофе в 40 лет.

В связи с этим можно сделать общий вывод, что нынешние характеристики воздушного движения для Северной Атлантики удовлетворяют предложенному ICAO числу катастроф на полетный час модели риска столкновений для одиночной воздушной трассы как в форме (1), так и в форме (2). Однако сегодняшние характеристики воздушного движения для Континентальной Европы не удовлетворяют числу  $2,5 \cdot 10^{-9}$  катастроф на полетный час в модели риска столкновений для одиночной воздушной трассы. Ожидаемое число аварий на полетный час в системе вследствие нарушений вертикального разделения  $N_{az}$  в приведенных примерах для Континентальной Европы значительно превышает число  $2,5 \cdot 10^{-9}$  (см. рис. 2, 4, 6). Следовательно, нынешние характеристики воздушного движения для указанного региона необходимо изменить с помощью рекомендованных методов.

Данная проблема касается и Украины, несмотря на то, что интенсивность воздушного движения на воздушных трассах Украины в настоящее время мала, но в будущем Украине все же предстоит столкнуться с этой проблемой.

### Список литературы

1. *Методика* определения минимумов эшелонирования, применяемых для разделения параллельных линий пути в структурах маршрутов ОВД. Циркуляр 120-AN/89/2. – ИКАО. – Монреаль, 1976. – 238 с.

Стаття надійшла до редакції 11 липня 2000 року.

УДК 533.607.13/G21.31

В 253.315 - 01-07 6738 +

053.41-089.0316 738

В.В. Панин, И.Ф. Кинашук, В.И. Орланов, А.Д. Донец

### РАЗРАБОТКА ПРОГРАММЫ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОГАЗОДИНАМИЧЕСКОГО ТЕЧЕНИЯ В ИОННОМ АНЕМОМЕТРЕ

*Приведено математическое описание явления сноса потока ионов коронного разряда при взаимодействии с газодинамическим потоком в разрядном промежутке «игла-плоскость», которое положено в основу создания ионного анемометра.*

Ионная анемометрия используется для измерения скорости потоков воздуха в атмосфере и для измерения скорости полета летательных аппаратов вертикального взлета и посадки [1]. Для безынерционного измерения локальной скорости и ускорения высокотурбулентных и знакопеременных потоков в проточной части газотурбинного двигателя разрабатывается ионный анемометр. Предлагается интегрировать датчик в автоматизированную систему ранней диагностики состояний авиационного двигателя в масштабе реального времени на основе контроля быстропротекающих процессов с применением математических моделей авторегрессионного анализа динамического сигнала измерения локальной скорости потока. В основу создания датчика положено явление сноса потока ионов коронного разряда при взаимодействии с газодинамическим потоком в разрядном промежутке "игла-плоскость".

Электрогазодинамическое (ЭГД) течение в ионном анемометре описывается следующей системой уравнений [2]:

$$\begin{aligned} V &= V_0 + V_e; \\ V_e &= kE; \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \operatorname{div} E &= \rho/\epsilon_0; \\ \operatorname{div} j &= -\delta\rho/\delta t; \end{aligned} \quad (2)$$

$$j = \rho V = qnV, \quad (3)$$

где  $V$  – вектор средней скорости ионов;  $V_0$  – вектор средней скорости потока воздуха;  $V_e$  – вектор средней скорости дрейфа ионов в электрическом поле;  $k$  – средняя подвижность ионов воздуха;  $E$  – вектор напряженности поля;  $\rho$  – пространственная плотность заряда;  $\epsilon_0 = 8.855 \cdot 10^{-12}$  – электрическая постоянная, Ф/м;  $j$  – вектор плотности тока;  $t$  – время;  $q$  – заряд одного иона;  $n$  – концентрация ионов.

Кроме того, на коронирующем электроде должно выполняться условие самостоятельности разряда [2; 3]:

$$\int_0^{l_{кр}} \alpha_{эф} dl = \ln N_{кр}, \quad (4)$$