

ЕКОЛОГІЧНА БЕЗПЕКА ОТОЧУЮЧОГО СЕРЕДОВИЩА

УДК 614.841; 551.515

М. В. КУСТОВ, канд. техн. наук, доц.

*Национальный университет гражданской защиты Украины
maksim_kustov@mail.ru*

Л. Ф. ЧЕРНОГОР, д-р физ.-мат. наук, проф.

Харьковский национальный университет им. В.Н. Каразина

ЧАСТИЧНАЯ ИОНИЗАЦИЯ ВОЗДУХА В ПОЛЕ МОЩНОГО РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ

Установлены условия, при которых СВЧ ионизирующее поле можно рассматривать как постоянное электромагнитное поле. По функции распределения электронов по энергиям определена концентрация быстрых электронов, способных к ионизации. На основе кинетической теории для быстрых электронов в веществе оценена возможность возникновения пробоя на убегающих электронах.

Ключевые слова: электромагнитное поле, ионизация газа, быстрые электроны, пробой в газе, функция распределения электронов по энергии

Kustov M. V., Chernogor L. F. PARTIAL IONIZATION OF THE AIR IN THE FIELD OF POWERFUL RADIO EMISSION

The conditions of the ionizing microwave field can be considered as a constant electromagnetic field is defines. On the distribution function of the electron energy is determined by the concentration of fast electrons capable of ionization. On the basis of kinetic theory for fast electrons in matter assessed the possibility of a breakdown by runaway electrons.

Key words: electromagnetic field, the ionization of the gas, fast electrons, the breakdown in the gas distribution function of the electron energy

Кустов М. В., Черногор Л. Ф. ЧАСТКОВА ІОНІЗАЦІЯ ПОВІТРЯ В ПОЛІ ПОТУЖНОГО РАДІОВИПРОМІНЮВАННЯ

Встановлено умови, при яких СВЧ іонізуюче поле можна розглядати як постійне електромагнітне поле. По функції розподілу електронів по енергіям визначена концентрація швидких електронів, здатних до іонізації. На основі кінетичної теорії для швидких електронів в речовині оцінено можливість виникнення пробоя на убігаючих електронах.

Ключові слова: електромагнітне поле, іонізація газу, швидкі електрони, пробій в газі, функція розподілу електронів по енергії

Введение

Постановка задачи. При загрязнении атмосферы осадки позволяют существенно снизить зону распространения радиоактивных и химически опасных веществ. Соответственно искусственное инициирование осадков над зоной загрязнения и увеличение их интенсивности обеспечит повышение экологической безопасности населения и территории. Наиболее активными центрами каплеобразования в атмосфере являются заряженные частицы (ионы). Поэтому среди прочих методов воздействия на атмо-

сферные процессы, одним из перспективных является искусственная ионизация воздуха. Ионизировать воздух на высоте облакообразования (1 – 3 км) на площади до 10 км² принципиально возможно путём облучения зоны воздействия пучками мощного электромагнитного излучения. Исходя из этого, целью работы является исследование механизма ионизации атмосферных газов в переменном электромагнитном поле, а также определение минимальной напряжённости электромагнитного поля и его частотного диапазона, обеспечивающего достаточную концентрацию ионов в воздухе для искус-

ственного инициирования осадков в зоне радиационного или химического загрязнения атмосферы.

Анализ последних достижений и публикаций. Вымывание осадками из атмосферы загрязняющих веществ происходит путём их седиментации на поверхности капель дождя [1, 2]. На сегодняшний день в целях интенсификации осадков применяются методы засева атмосферы химическими центрами каплеобразования (соли AgI) и ядрами кристаллизации (твёрдый CO₂) [3]. Однако применение таких методов жёстко ограничено метеорологическими условиями, при которых их можно применять. Снизить требования по метеоусловиям для искусственного инициирования осадков позволяет использование в качестве ядер кон-

денсации ионов [1, 3 - 5]. Использование СВЧ излучателей для дистанционной ионизации зоны атмосферы [6] позволяет исключить использование технических средств доставки ядер конденсации, что, следовательно, приведёт к снижению материальных затрат на реализацию процесса.

Процесс пробоя газа в мощном переменном электромагнитном поле рассмотрен в работах [6, 7]. Однако инициирование осадков может происходить и при частичной ионизации газа [8]. Исходя из этого, для снижения энергозатратности процесса возникает необходимость в исследовании возможности частичной ионизации атмосферных газов в переменных электромагнитных полях с напряжённостью ниже пробойной.

Распределение свободных электронов по энергиям в нормальной тропосфере без возмущений

Основной характеристикой свободных электронов является функция их распределения по энергиям (ФРЭЭ), которая находится из кинетического уравнения Больцмана [7]:

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \vec{v} \frac{\partial f}{\partial \vec{r}} + \frac{e}{m} \vec{E} \frac{\partial f}{\partial \vec{v}} = S \text{ () } q(\epsilon), \quad (1)$$

где: $f \text{ (} \vec{r}, \vec{v} \text{)}$ – функция распределения электронов по координатам \vec{r} и скоростям \vec{v} ; e – заряд электрона; m – масса электрона; \vec{E} – мгновенная напряжённость электрического поля; $S(f)$ – интеграл соударений; $q(\epsilon)$ – источник первичных электронов с энергией ϵ .

Рассмотрим сначала распределение электронов в нижней тропосфере при нормальных условиях без внешнего воздействия электромагнитного поля ($E=0$). Вследствие того, что, масса электрона много меньше массы нейтральной молекулы средняя скорость хаотического движения электронов значительно превышает направленную скорость [6, 7]. Для рассматриваемого процесса $\frac{\partial f}{\partial t} = 0$. Кроме того, для од-

нородного образования $\frac{\partial f}{\partial \vec{r}} = 0$. Тогда (1) примет вид:

$$S \text{ () } q(\epsilon) = 0, \quad (2)$$

Источник первичных электронов $q(\epsilon)$ определяется диффузией высокоэнергичных электронов с верхних слоёв атмосферы, которые образуются за счет действия на нейтральные молекулы газа космических лучей с энергией $\epsilon_s \geq 1$ МэВ. Как следует из закона сохранения частиц, количество приходящих и уходящих электронов из рассматриваемой области одинаково, а параметр $q(\epsilon)$ описывает приток электронов с энергией ϵ .

При рассмотрении интеграла соударений $S(f)$ обозначим важное начальное условие. При малой концентрации свободных электронов по сравнению с концентрацией нейтральных молекул электрон-электронным взаимодействием можно пренебречь. Тогда $S(f)$ можно представить в виде:

$$S(f) = \sum_{\alpha} [S_m(f) + \sum S_k(f) + S_i(f) + S_a(f)], \quad (3)$$

где: $S_m(f)$ – интеграл упругих столкновений электрона с нейтральной молекулой; $S_k(f)$ – интеграл неупругих столкновений (возбуждение вращательных, колебательных и электронных состояний молекул); $S_i(f)$ – интеграл ионизации; $S_a(f)$ – интеграл прилипания электронов к

нейтральним молекулам. Суммирование идёт по разным сортам нейтральных молекул α .

Для решения поставленной в работе задачи важно знать объемную концентрацию свободных электронов, которая определяется через их плотность потока по соотношению:

$$j = n \cdot \int f_w w dw, \quad (4)$$

где: j – плотность потока электронов; n – концентрация электронов в единице объёма, м^{-3} ; f_w – функция распределения электронов по скоростям w .

Если принять плотность потока первичных электронов космических лучей с энергией $\epsilon_s \geq 1$ МэВ порядка $10^3 \text{ м}^{-2}\text{с}^{-1}$ [9], что приближённо соответствует условиям нормальной тропосферы, то функция их распределения по энергиям, приведенная к

единице объёма, будет иметь вид, представленный на рис. 1. При расчётах использовались значения сечений процессов упругих и неупругих столкновений электрона с нейтральной молекулой, ионизации и прилипания электронов к нейтральным молекулам [10-11]. Функция распределения представлена в пределах от энергий тепловых электронов (10^{-1} эВ) до 10^3 эВ. При энергиях порядка 10^{-1} эВ электрон рекомбинирует при взаимодействии с нейтральной молекулой или ионом, этот факт обуславливает восходящий характер кривой функции в зоне низких энергий электрона. Область функции от 10^3 эВ до энергии первичных электронов (10^6 эВ) на графике не представлена, так как имеет монотонно ниспадающий характер.

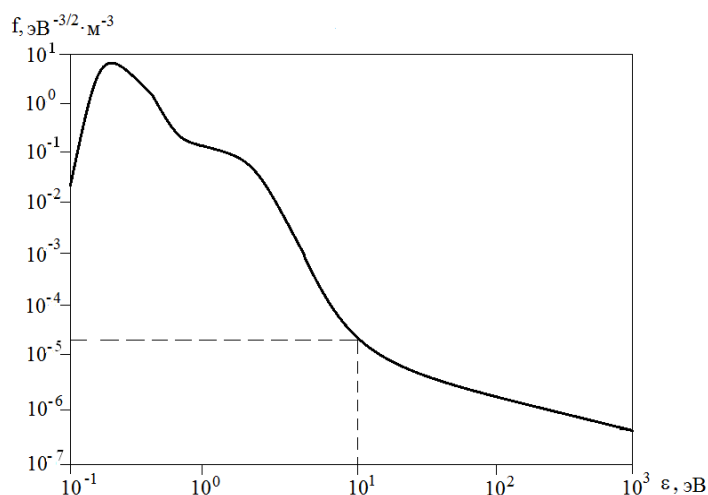


Рис. 1. Графический вид функции распределения электронов по энергиям в единице объёма тропосферы

Как видно из рисунка 1, распределение электронов не является монотонным и несколько отличается от максвелловского в области низких энергий электронов. Это объясняется тем, что при низких энергиях взаимодействие с нейтральными молекулами оказывает значительное влияние. Также сечения процессов ионизации, возбуждения колебательных, электронных и вращательных уровней, а также их энерговклад имеют разный порядок. Соответственно, это приводит к доминированию отдельных механизмов энергетических потерь, которое особенно проявляется при низкой энергии электронов.

Используя полученные данные, определим концентрацию высокоэнергичных

электронов при нормальных условиях. Потенциал ионизации нейтральных молекул и атомов в атмосфере $\epsilon_i \sim 10$ эВ (например, для первичной ионизации молекулы кислорода $\text{O}_2 \rightarrow \text{O}_2^+$ $\epsilon_i = 12,07$ эВ). Соответственно из анализа ФРЭЭ (рис. 1) в нормальных условиях существует около 10^{-5} м^{-3} высокоэнергичных электронов, способных к ионизации. Процесс ионизации быстрыми электронами вносит свой вклад в фоновую концентрацию положительных ионов в атмосфере – 10^8 – 10^9 м^{-3} [1]. Значительное различие значений концентрации свободных электронов и ионов объясняется разной продолжительностью существования в свободном состоянии – для электрона ~ 10 нс, а свободные ионы могут существовать вплоть

до нескольких часов. Однако для интенсификации процесса осадкообразования этого недостаточно (необходимая концентрация ионов 10^{11} – 10^{13} м⁻³ [8,12]). Следовательно,

для увеличения концентрации ионов на 3–4 порядка необходимо искусственное повышение энергии свободных электронов.

Распределение свободных электронов по энергиям в тропосфере в поле электромагнитного СВЧ излучения

Рассмотрим поведение электрона под действием переменного электромагнитного поля.

Уравнение движения электрона в изотропной плазме имеет вид [13]:

$$\frac{d\vec{v}_e}{dt} = \frac{e\vec{E}}{m_e} - \nu_m \vec{v}_e, \quad (5)$$

где: v_e – скорость электрона в электромагнитном поле; t – текущее время; $\vec{E}(t) = E_0 \cos(\omega t)$, \vec{E} – мгновенная напряжённость электрического поля; E_0 – амплитудное значение напряжённости электрического поля; ω – круговая частота электрического поля; ν_m – возмущённая частота столкновений электронов с нейтральными молекулами.

Второе слагаемое в (5) определяет изменение скорости за счет торможения электронов при соударении с нейтральными молекулами. При скоростях электронов выше ионизационной скорости ($v_e \geq v_{ei}$) при столкновениях, как отмечалось выше, про-

исходит ионизация молекул и рост концентрации заряженных центров конденсации.

Из уравнения (5) направленная скорость электронов определяется как:

$$\vec{v}_e = \frac{e\vec{E}}{m_e(\omega + \nu_m)},$$

или по модулю

$$|\vec{v}_e| = \frac{eE}{m_e \sqrt{\omega^2 + \nu_m^2}}. \quad (6)$$

В нижней тропосфере (высота $H = 1 - 5$ км) частота столкновения электронов с нейтральными молекулами составляет $\nu_m \approx (1,4 - 0,9) \cdot 10^{11}$ с⁻¹ [6], тогда как частота радиоизлучения находится в диапазоне $\omega \approx 10^8 - 10^{10}$ с⁻¹. Из (6) видно, что при условии $\omega^2 \ll \nu_m^2$ электрон в переменном

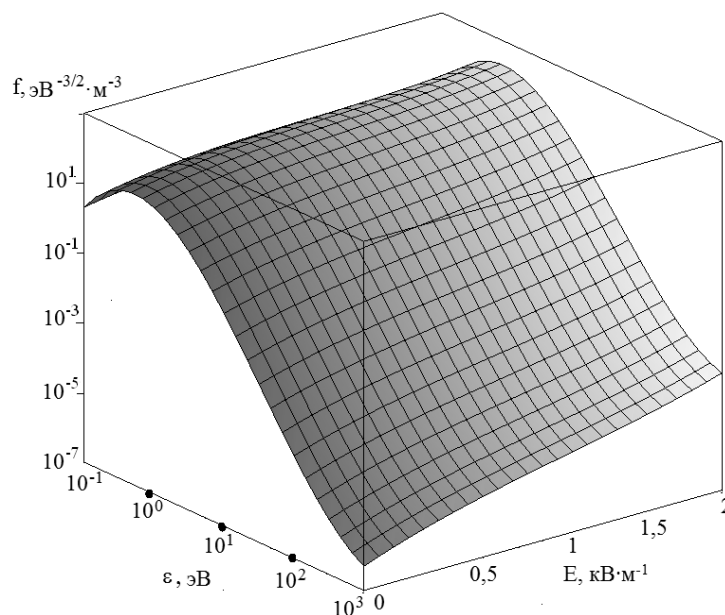


Рис. 2. Распределение электронов по энергиям в электрическом поле с различной напряжённостью E

электрическом поле ведёт себя так же, как и в постоянном электрическом поле, соответственно уравнение (6) примет вид:

$$|\bar{v}_e| \approx \frac{\sqrt{2}e|\bar{E}_0|}{m_e v_m}. \quad (7)$$

Основываясь на (1) с учётом (2 – 4) рассмотрим изменение во времени функции распределения электронов по энергии при различной напряжённости поля (рис. 2).

Анализ рис. 2 показывает, что в поле электромагнитного излучения общая концентрация свободных электронов возрастает практически на два порядка. Также по при-

чине того, что в поле скорость падения энергии электронов значительно ниже, чем в невозмущённой тропосфере, электромагнитное излучение существенное влияние оказывает на рост концентрации именно высокоэнергичных электронов. При этом концентрация высокоэнергичных электронов возрастает на 3–4 порядка при напряжённости поля $E = (1,2 - 1,5) \text{ кВ}\cdot\text{м}^{-1}$. Данное значение напряжённости значительно ниже пробойного для воздуха при нормальных условиях ($2\text{МВ}\cdot\text{м}^{-1}$). Соответственно в данном случае можно говорить о частичной ионизации тропосферы.

Экспериментальная проверка полученных результатов

Для проверки полученных теоретических результатов проведен лабораторный эксперимент по измерению концентрации лёгких ионов в воздухе в поле электромагнитного излучения различной напряжённости. Эксперимент проводился на установке и по методике описанными в работе [14]. Результаты экспериментов представлены на рис. 3.

Результаты измерений подтвердили увеличение концентрации лёгких ионов в воздухе под действием электромагнитного поля. Характер зависимостей концентрации ионов и электронов от напряжённости поля подобны, что подтверждает представления о частичной ионизации воздуха высокоэнергичными электронами.

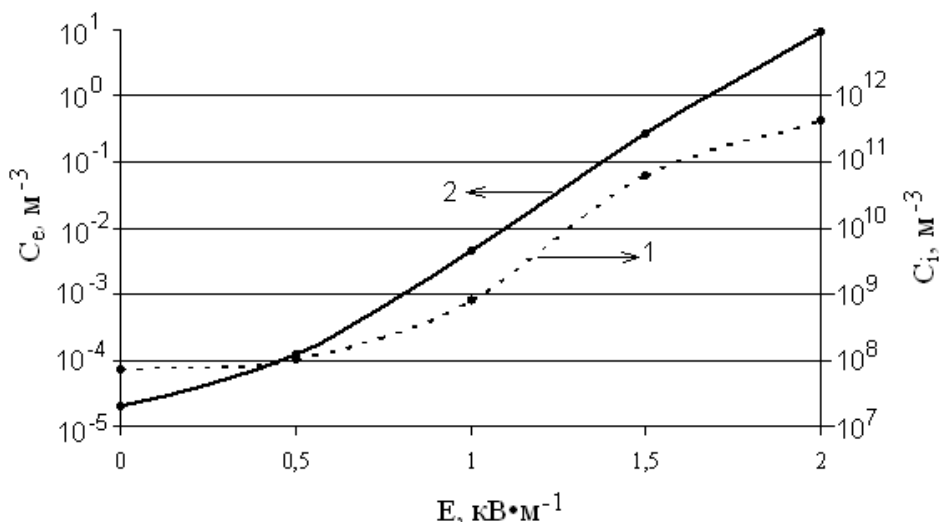


Рис. 3. Зависимость концентрации лёгких ионов в воздухе (эксперимент) (кривая 1) и свободных электронов с энергией $\epsilon_i \geq 10$ эВ (теория) (кривая 2) от напряжённости электромагнитного поля.

Как видно из графика, результаты измерений несколько отличаются от теоретических данных. Это в первую очередь связано с приближённым значением параметра

$q(\epsilon)$, который использовался при расчётах, а также с тем, что сечение взаимодействий электронов имеют вероятностный характер. Кроме того, при измерении концентрации

ионов проводилось прокачивание исследуемого объема воздуха через измерительную камеру счётчика аэроионов, в результате чего их концентрация падала на пути следования за счёт гетерогенной и гомогенной рекомбинации. Большие значения концентрации ионов относительно концентрации электронов при отсутствии электромагнит-

ного поля объясняется существенным влиянием на общую концентрацию ионов природной радиоактивности от поверхности земли, тогда как при увеличении напряжённости поля доминирующую роль в процессе ионизации начинают играть высокоэнергичные электроны.

Возникновение убегающих электронов при частичной ионизации воздуха

В постоянных полях при определённых условиях возможно появление пробоя на убегающих электронах, что приводит к быстрому росту энергии электронов при сравнительно малых значениях напряжённости электрического поля. Это явление теоретически предсказано ещё в 1992 г. [15] и основано на особенностях взаимодействия высокоэнергетичных электронов с нейтральными молекулами. Сила торможения быстрых электронов определяется ионизационными потерями [16], которая падает с ростом энергии электрона.

Для появления пробоя на убегающих электронах в поле должны выполняться три основных условия [9] (зависимости представлены, согласно источнику, в системе СГС):

– напряжённость электрического поля должна превышать определённое критическое значение ($E \geq E_c$):

$$E_c = \frac{4\pi e^3 Z N_m}{m_e c^2} \alpha, \quad \alpha \approx 11, \quad (8)$$

где Z – среднее число электронов в нейтральных молекулах; N_m – концентрация молекул;

– присутствие затравочных высокоэнергетичных электронов с энергией $\varepsilon \geq \varepsilon_c$, где:

$$\varepsilon_c \approx \frac{E_c}{2E} m_e c^2, \quad (9)$$

– достаточный масштаб постоянного электрического поля $l \geq l_c$, где:

$$l_c = \frac{\hbar_e c^2}{2\pi Z N_m e^4} \cdot \frac{E_c}{E}. \quad (10)$$

Проверим выполнение данных условий для случая искусственной ионизации нижней тропосферы радиоизлучением.

Основными составляющими нижней тропосферы являются азот (N_2) и кислород (O_2) с 14 и 16 электронами, соответственно, и их концентрация на высоте 1 – 5 км составляет $N_m \approx (2,4 - 1,7) \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3}$. Для таких условий пороговая напряжённость поля для возникновения пробоя на убегающих электронах имеет значение $E_c \approx (2,1 - 1,5) \cdot 10^5 \text{ В} \cdot \text{м}^{-1}$, что на порядок ниже пороговой напряжённости для обычного пробоя в газе.

Как уже отмечалось выше, одним из необходимых условий является присутствие высокоэнергичных затравочных электронов с $\varepsilon \geq \varepsilon_c$. Для рассматриваемых нами условий $\varepsilon_c \approx 0,1 \text{ МэВ}$. Как указывалось выше, в нормальных условиях тропосферы такие электроны постоянно присутствуют, что удовлетворяет требованиям возникновения пробоя на убегающих электронах.

Для анализа характерного масштаба l_c , который согласно (10) для нижней тропосферы при $\frac{E_c}{E} \approx 1$ составляет около (52–73)

м, необходимо сопоставить его как с общим размером зоны облучения L , так и с длиной пробега свободного электрона l_e , когда поле можно рассматривать как постоянное.

Размер зоны облучения определяется размером единичного луча в случае использовании одного излучателя и размерами области пересечения N лучей в случае использования нескольких фазированных излучателей. И в обоих случаях наименьший размер имеет поперечное сечение, размеры которого определяются углом раскрытия луча и расстоянием от источника излучения.

Большинство промышленных излучателей с рабочим диапазоном СВЧ имеет угол раскрытия $2^\circ - 4^\circ$, что уже на высоте 1500 м даёт диаметр сечения луча 52 – 80 м, соответственно. Следовательно, размеры зоны облучения наземными источниками удовле-

творюють умовам виникнення пробоя на убігаючих електронах.

Так як середня енергія розглядаємих вільних електронів складає $\varepsilon \approx 10$ эВ, відповідно їх середня швидкість

складає $v \approx 1,8 \cdot 10^6$ м·с⁻¹. Таким чином, убігаючі електрони можуть виникати тільки лише при електромагнітній випромінюванні з частотою нижче $f < 300$ кГц.

Висновки

1. На основі функції розподілу електронів по енергіям в тропосфері при нормальних умовах визначена концентрація вільних електронів, здатних до іонізації молекул повітря: $\sim 10^{-5}$ м⁻³.

2. Теоретичні дослідження показали можливість збільшення концентрації високоенергетичних електронів в полі електромагнітних сил.

3. Результати розрахунків перевірені експериментально і підтверджена можливість збільшення концентрації іонів в повітрі на 3 – 4 порядків в електромагнітному полі з напруженістю 1,5 – 2 кВ·м⁻¹.

4. Демонстровано кореляція між концентраціями високоенергетичних електронів і вільних іонів в електромагнітному полі, що свідчить про можливість часткової іонізації тропосфери електромагнітним СВЧ випромінюванням.

5. Оцінено можливість реалізації механізму виникнення убігаючих електронів в змінному електромагнітному полі. Показано, що даний ефект може виникнути в змінному полі при частотах $f < 300$ кГц.

Література

1. Івлєв Л. С. Фізика атмосферних аерозольних систем / Л. С. Івлєв, Ю. А. Довгалюк. – СПб.: НІИХ СПбГУ, 1999. – 194 с.

2. Семенченко Б. А. Фізическа метеорологія / Б. А. Семенченко // М.: Аспект Прогрес, 2002. – 415 с.

3. Качурин Л. Г. Фізическі основи впливу на атмосферні процеси / Л. Г. Качурин // Л.: Гідрометеоиздат, 1990. – 463 с.

4. Куни Ф. М. К теорії зародкоутворення на заряджених ядрах. 2. Термодинамічні параметри рівноважного зародка / Ф. М. Куни, А. К. Щекин, А. І. Русанов // Коллоїдний журн, 1982. - Т. 44. № 6. - С. 1062-1068.

5. Палей А. А. Дослідження процесів конденсації парів на електрично заряджених аерозольних частинках / А. А. Палей, В. Б. Лапшин, Н. В. Жохова, В. В. Москаленко // Електронний науковий журнал «Досліджено в Росії» - <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2007/027.pdf>.

6. Борисов Н. Д. Искусственная ионизированная область в атмосфере / Н. Д. Борисов, А. В. Гуревич, Г. М. Милих. – М.: ИЗМИРАН, 1986. – 348 с.

7. Гинзбург В. Л. Нелинейные явления в плазме, находящейся в переменном электромагнитном поле / В. Л. Гинзбург, А. В. Гуревич // УФН. – 1960. – Т. 70. Вып. 2. – С. 201 – 246.

8. Кустов М. В. Влияние концентрации ионов в атмосфере Земли на процессы осадкообразования над зоной пожара / М. В. Кустов // Научные и образовательные проблемы гражданской защиты. – Химки: АГЗ МЧС России, 2014. – № 2(21). – С. 114-118.

9. Гуревич А. В. Пробой на убігаючих електронах і електричні розряди во время грозы / А. В. Гуревич, К. П. Зыбин // УФН, 2001. – Том 171, № 11. – С. 1177 – 1199.

10. Gordillo-Vazquez F. J. Electron energy distribution functions and transport coefficients relevant for air plasmas in the troposphere / F. J. Gordillo-Vazquez, Z. Donko // PLASMA SOURCES SCIENCE AND TECHNOLOGY – vol. 18, № 3. – 2009. – p. 1-13.

11. Phelps A. V. http://jila.colorado.edu/collision_data/electron.txt.

12. Кустов М. В. Влияние концентрации ионов в атмосфере на интенсивность осадков над зоной выброса опасных веществ / М. В. Кустов // Проблемы надзвичайних ситуацій. – Харків: НУЦЗ України, 2014. – № 20. – С. 93-98.

13. Дятко Н. А. Кинетика электронов в СВЧ-разряде / Н. А. Дятко, И. В. Кочетов, А. П. Напортович // Высоочастотный разряд в волновых полях. – 1988. – С. 9 - 40.

14. Кустов М. В. Установка для моделирования процессов конденсации в атмосферных акваэрозолях / М. В. Кустов, В. Д. Калугин // Проблемы надзвичайних ситуацій. – Х.: НУЦЗУ, 2012. – Вып. 16. – С. 54-57.

15. Gurevich A. V. Runaway electron mechanism of air breakdown and preconditioning during a thunderstorm / A. V. Gurevich, G. A. Milikh, R. Roussel-Dupre // Phys. Lett. A. 1992. V. 165. P. 463 .

16. Bethe H A, Ashkin J, in Experimental Nuclear Physics Vol. 1 Ed. E Segre, New York: Wiley, 1953. p. 277.

Надійшла до редколегії 16.02.2015