

*М.В. Кустов, к.т.н., ст. преподаватель, НУГЗУ,
В.Д. Калугин, д.х.н., профессор, НУГЗУ*

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССА КАПЛЕОБРАЗОВАНИЯ В АТМОСФЕРЕ ПУТЕМ АКТИВНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА НЕЁ МОЩНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Рассмотрено влияние ионизации атмосферы в зоне активного осадкообразования на процесс искусственного воздействия на атмосферные аэрозоли с целью обеспечения необходимого количества осадков для ликвидации различных ЧС. Проведена сравнительная оценка различных методов ионизации (воздействия) на атмосферные аэрозоли. Определена необходимая напряженность электромагнитного поля для эффективной ионизации атмосферы.

Ключевые слова: искусственное осадкообразование, ион, ионизация газа, пучки микроволн, СВЧ излучение, интенсивность электромагнитного излучения, напряжённость электрического поля.

Постановка проблемы. При ликвидации чрезвычайных ситуаций (ЧС) различной природы (тушение лесных и степных пожаров с помощью конденсированной из атмосферы воды, осаждение твёрдых продуктов вулканического извержения, регуляция обводнённости местности и др.) определяющую роль играет наличие или отсутствие атмосферных осадков в зоне ЧС. Поэтому успешное решение задачи искусственного управления процессами осадкообразования в заданном районе существенно повышает эффективность борьбы с целым рядом ЧС как природного, так и техногенного характера. Однако контролируемое управление атмосферными процессами требует использование достаточно сложного оборудования и значительных энергозатрат. В этой связи одной из проблем, подлежащей разрешению, является исследование процесса активного воздействия на атмосферу мощными пучками микроволн.

Анализ последних достижений и публикаций. Вопросам искусственного влияния на атмосферные процессы уделяется большое внимание на протяжении многих лет. На сегодняшний день разработаны и активно применяются такие методы как искусственное охлаждение некоторой зоны атмосферы за счёт распыления жидкого углекислого газа (CO₂) [1], что приводит к интенсификации процесса образования осадков из облаков. Нашел широкое применение метод активизации осадкообразования из облаков путём распыления солей йода [2-3]. Эти реагенты доставляются в зону воздействия либо с

помощью летательных аппаратов, либо баллистическим методом [4]. Однако, данные методы имеют ряд ограничений по своему применению. В работе [5] установлено значительное влияние на скорость каплеобразования в атмосфере присутствия электрически заряженных частиц, в частности ионов и ионных кластеров. Поэтому установление возможности ионизации воздуха в необходимой зоне атмосферы позволит более успешно решить задачу эффективного конденсирования атмосферной влаги.

Постановка задачи и её решение. Целью работы является исследование возможности управления процессами конденсации воды в атмосфере мощными пучками микроволн для обеспечения условий эффективной ликвидации чрезвычайных ситуаций.

Существенное влияние на процесс ликвидации масштабных пожаров большой площади на открытой местности оказывает наличие осадков в зоне ЧС, поскольку они (осадки) способствуют повышению влажности, снижению температуры и являются мощным источником огнетушащего материала (воды). Существующее на сегодняшний день большое количество научных и практических разработок в области климатологии и метеорологии [6-8] свидетельствует о возможности искусственного управления процессами осадкообразования. В связи с этим дальнейшее изучение данной проблемы является весьма актуальным и перспективным для повышения эффективности борьбы с крупными пожарами на открытой местности.

Среди водосодержащих аэрозольных частиц в атмосфере (облаках) присутствуют, как нейтральные, так и заряженные частицы. При нормальных условиях концентрация заряженных частиц незначительная ($\sim (2 - 3) \cdot 10^3 \text{ см}^{-3}$). Основную группу заряженных аэрозольных частиц в атмосфере составляют тяжёлые ионы (радиус от $7 \cdot 10^{-3}$ до $1 \cdot 10^{-1}$ мкм), которые образуются путём присоединения ионизированных молекул или свободных электронов к нейтральной акваэрозольной частице. Меньшую концентрацию имеют лёгкие ионы, представляющие из себя ионизированные молекулы, либо части молекул, и ионные кластеры, состоящие из нескольких молекул или атомов ($r \sim 7 \cdot 10^{-4}$ мкм) [9]. Отдельную группу представляют свободные электроны, концентрация которых из-за короткого срока существования в атмосфере незначительна.

Ионы образуются при воздействии на атмосферные газы элементарных частиц с большой энергией и мощного электромагнитного излучения. В природных условиях основными источниками ионизации являются излучение радиоактивных веществ земной коры и космические лучи.

Все ионы характеризуются подвижностью, численно равной скорости движения иона под действием электрической силы в поле

напряженностью, равной единице [9]:

$$u = a \left(\frac{e}{m} \right) \cdot \left(\frac{\lambda_u}{v_T} \right), \quad (1)$$

где a – некоторый численный коэффициент (порядка 0,5 – 1,0); e/m – отношение заряда иона к его массе, Кл/кг; λ_u – средняя длина свободного пробега иона, м; v_T – средняя скорость его теплового движения, м/с.

Оценка подвижности атмосферных ионов по (1) представлена в табл. 1.

Таблица 1 – Подвижность различных классов ионов

Группа ионов	u , см ² /(с·В)	$r \cdot 10^8$, см
Легкие	1 - 3	7 - 10
Средние	0,01 - 0,001	10 - 250
Тяжелые	0,001 - 0,00025	250 - 500
Ультратяжелые	< 0,00025	> 500

При оценке подвижности атмосферных ионов не учитывалось влияние химической природы молекул и присутствие дипольных молекул воды, которые непосредственно влияют на подвижность ионов.

Концентрация лёгких ионов определяется балансом процессов образования и рекомбинации. Учитывая, что концентрация положительно заряженных ионов практически равна концентрации отрицательно заряженных, получим:

$$\frac{dn}{dt} = q - \alpha \cdot n^2, \quad (2)$$

где q – число образовавшихся пар ионов; α – коэффициент рекомбинации легких ионов, n – концентрация ионов.

Как уже отмечено выше, в атмосфере легкие ионы исчезают не только за счёт рекомбинации, но и путём оседания (прилипания) на нейтральных частицах и тяжелых ионах, следовательно уравнение (2) примет вид:

$$\frac{dn}{dt} = q - \alpha \cdot n^2 - \eta \cdot n \cdot N_0 - \gamma \cdot n \cdot N, \quad (3)$$

где N_0 , N – концентрации нейтральных частиц и тяжёлых ионов соответственно; η , γ – коэффициенты прилипания.

В работе [9] приведены следующие значения коэффициентов прилипания для безоблачной погоды: $\alpha \approx 1,6 \cdot 10^{-6}$ см³/с, $\eta \approx 4,3 \cdot 10^{-6}$ см³/с, $\gamma \approx 6,5 \cdot 10^{-6}$ см³/с. Исходя из этих данных и учитывая, что концентрации нейтральных частиц и тяжёлых ионов на порядок выше концен-

трации лёгких ионов, можно заключить, что ионизация воздуха приведёт к появлению заряда на твёрдых и жидких аэрозольных частицах.

Процесс заряжения водосодержащих частиц атмосферного аэрозоля вследствие захвата ими ионов зависит от подвижности ионов. Как видно из табл. 1 подвижность лёгких ионов на несколько порядков выше более тяжелых классов ионов, поэтому основной вклад в процесс заряжения аэрозольных частиц дают именно лёгкие ионы. На каплях могут осаждаться как положительные, так и отрицательные ионы, поэтому отличный от нуля заряд атмосферных аэрозольных частиц будет обусловлен различной массой ионов, их различными коэффициентами диффузии ($D^- \approx 0,043 \text{ см}^2/\text{с}$, $D^+ \approx 0,028 \text{ см}^2/\text{с}$), разными по знаку заряда проводимостями воздуха, фрактальной структурой твёрдых водосодержащих образований и с избирательными свойствами поверхности жидких капель, что связано с наличием на поверхности раздела электрического слоя, препятствующего проникновению внутрь капли положительных ионов. Возможность образования электрически заряженных водосодержащих атмосферных аэрозольных частиц дополнительно подтверждает высказанные в работе [5] представления о положительном влиянии ионизации на процесс интенсификации осадкообразования.

Исходя из того, что под понятием «ионизации» понимают отщепление электрона от нейтральной молекулы либо разрыв нейтральной молекулы на несколько заряженных частей, соответственно все методы ионизации основаны на обеспечении в реакционной зоне энергии, достаточной для отщепления электрона либо разрыва молекулы. Из основных компонент атмосферного воздуха самую низкую энергию ионизации имеет кислород (табл. 2) [10], следовательно в дальнейшем будем рассматривать именно этот механизм ионизации воздуха как наиболее вероятный.

Таблица 2 – Потенциалы ионизации основных газов атмосферы

Образовавшийся ион/ первичная молекула	Потенциал ионизации E_i , eV
N_2^+/N_2	15,581±0,008
N^+/N_2	14,5341
O_2^+/O_2	12,0697±0,0002
O^+/O_2	13,6181
$\text{H}_2\text{O}^+/\text{H}_2\text{O}$	12,621±0,002
$\text{CO}_2^+/\text{CO}_2$	13,777±0,001
Ar^+/Ar	15,759±0,001
Kr^+/Kr	13,999±0,00001

Исходя из приведенных выше энергетических оценок проанализируем возможности существующих методов ионизации для реше-

ния поставленной в работе задачи. Ионизаторы работают или при высоком напряжении ($\sim 10^3$ В) в режиме коронного разряда, или от источников электромагнитного излучения различной интенсивности. Ионизаторы на коронном разряде оснащены заострёнными электродами, которые посредством коронного разряда и электростатической эмиссии образуют ионы в непосредственной близости от электродов. Время существования ионов в атмосфере зависит от их энергии диссоциации, подвижности, заряда и др. и составляет порядка $10^{-3} - 10$ с. Следовательно, перемещение ионов с таким временем жизни на высоте активного осадкообразования (1-5 км) невозможно.

Метод ионизации газов с использованием электромагнитного излучения основан на принципе разрушения молекул среды фотонами с высокими уровнями энергии и подразделяется на два подкласса в зависимости от интенсивности излучения – ионизацию при ультрафиолетовом излучении и - радиационном излучении. Метод ионизации на основе электромагнитного излучения позволяет ионизировать газы на значительном удалении от источника электромагнитных волн, что позволяет использовать данный метод для решения поставленной проблемы.

Проанализируем возможность использования ультрафиолетового и радиационного излучения для ионизации воздуха на высоте 1 – 5 км. Интенсивность излучения меняется с расстоянием h по закону Рэлея:

$$I_h = I_0 \cdot e^{-\sigma \cdot h}, \quad (4)$$

где I_h – интенсивность электромагнитного излучения на высоте h ; I_0 – начальная интенсивность излучения; σ – сечение рассеяния, которое определяется как:

$$\sigma = \frac{8\pi^3(n^2 - 1)}{3N \cdot \lambda^4} \cdot \frac{6 + 3\Delta}{6 - 7\Delta},$$

где n – показатель преломления воздуха; N – число частиц, на которых происходит рассеяние; λ – длина волны излучения; Δ - фактор деполяризации рассеянного излучения (для молекул воздуха $\Delta \approx 0,035$).

Анализ уравнения (4) показывает, что интенсивность ультрафиолетового излучения с $\lambda \approx 10^{-7}$ м на высоте 5 км снижается на ~ 73 % (учёт рассеяния излучения на крупных аэрозольных частицах ещё больше увеличат потери интенсивности). Из этого следует, что значительная потеря интенсивности излучения в ультрафиолетовой области не позволяет использовать его для ионизации атмосферы в зоне активного осадкообразования.

Интенсивность радиационного излучения, несмотря на ещё меньшую длину волны ($\lambda = 10^{-14}$ м), из-за большой энергии в импульсе снижается с расстоянием несущественно. По причине того, что радиационное излучение в большей степени проявляет корпускулярные свойства, а волновые свойства проявляются незначительно, коэффициент его ослабления определяется как:

$$\sigma = \tau + \mu + \chi, \quad (5)$$

где τ – коэффициент фотоэлектронного поглощения; μ – коэффициент комптонского рассеивания; χ – коэффициент образования электрон-позитронных пар.

Для излучения с энергией фотона 100 КэВ, в соответствии с (5), коэффициент рассеяния для воздуха будет составлять $\sim 0,1$. Однако отсутствие технических средств фокусировки радиационного излучения и его крайне негативные экологические свойства также не позволяют использовать данный метод для целей искусственного осадкообразования.

Проведенный анализ позволяет сделать вывод о перспективности использования для интенсификации процессов осадкообразования в зоне пожара метода ионизации газов электромагнитным излучением СВЧ диапазона. Излучение данного диапазона ($\lambda = 10^{-2}$ м) оказывает слабое воздействие на экологическое состояние окружающей среды, имеет невысокий коэффициент ослабления ($\sim 26\%$), а также в настоящее время разработаны эффективные технические средства генерации СВЧ излучения.

Использование СВЧ излучения для ионизации газов было предложено ещё в работе [11], однако активная разработка возможностей практического использования этого вида излучения только начинается [12, 13].

Исходя из вышеизложенного, рассмотрим возможности мощного электромагнитного излучения (МЭМИ) СВЧ диапазона для воздействия на атмосферные аэрозоли.

Ионизируемую область атмосферы будем рассматривать как однородную газовую среду с давлением p и с начальной концентрацией свободных электронов n_{e_0} , которая существенно меньше концентрации нейтральных частиц и нейтральных молекул N_m , на которых происходит рассеяние. Такая модель вполне соответствует реальным условиям состояния атмосферы.

Распространение СВЧ импульса длительностью τ и частотой ω для предлагаемой модели описывается волновым уравнением [14]:

$$\frac{\partial^2 \bar{E}}{\partial z^2} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \bar{E}}{\partial t^2} = \frac{4\pi}{c^2} \left[(n_{e_0} + n_e) \frac{\partial \bar{V}_e}{\partial t} + \bar{V}_e \frac{\partial n_e}{\partial t} \right], \quad (6)$$

где n_e – концентрация электронов; V_e – осциляторная скорость электронов; E – напряженность электрического поля.

Если принять плотность тока: $\bar{j} = e\bar{V}_e(n_{e_0} + n_e)$, то изменение концентрации электронов в процессе ионизации частиц газовой среды в электромагнитном поле можно описать уравнением:

$$\frac{\partial n_e}{\partial t} = (v_i - v_n)n_e - \text{div} \bar{j}, \quad (7)$$

где v_i – частота ионизации; v_n – частота потерь электронов в результате рекомбинации и присоединения к аэрозольным частицам с образованием тяжёлых ионов.

Частоты v_i и v_n зависят от энергии электронов. Согласно [15] в модели ионизации воздуха предполагается, что за время между столкновениями (при свободном пробеге) электрон под действием поля набирает энергию ε до тех пор, пока она не достигнет величины потенциала ионизации газа E_i . Затем при столкновении электрон всю свою энергию передаёт молекуле, в результате чего происходит следующий этап - ионизация. Данная модель процесса ионизации имеет несколько упрощённый вид, однако она позволяет оценить критическую напряженность поля, при которой происходит рост концентрации ионов (количество образованных электронов (и ионов) выше количества рекомбинированных частиц):

$$E_{\text{кр}}^2 > \frac{4E_i}{e/m} \frac{\omega^2 + \frac{1}{3}v_{\text{me}}^2}{v_{\text{me}}} \frac{1}{\tau} \ln \left(\frac{n_{\text{cr}}}{n_{e_0}} \right), \quad (8)$$

где e и m – заряд и масса электрона; v_{me} – частота соударений электронов с нейтральными частицами; τ – время импульса излучения; n_{e0} – начальная концентрация электронов; n_{cr} – критическая концентрация электронов для частоты падающего СВЧ - излучения ω .

Анализ модели (8) с учётом данных табл. 2, с использованием пакета математических программ Maple, позволил получить значения критической напряжённости электромагнитного поля при различных условиях (рис. 1, 2). Для атмосферы на высоте ~ 5 км $v_{\text{me}} \approx 10^{10} \text{ с}^{-1}$.

Из рис. 1, 2 видно, что при большой частоте излучения длительность импульса несущественно влияет на критическую напряжённость поля. Резкий максимум в области низкой частоты излучения можно объяснить приближением характеристик излучения к ус-

ловиям, когда частота излучения ω за время импульса τ будет стремиться к единице. При достижении этого условия, как видно из рис. 1, достичь критической напряжённости поля невозможно ($E \rightarrow \infty$).

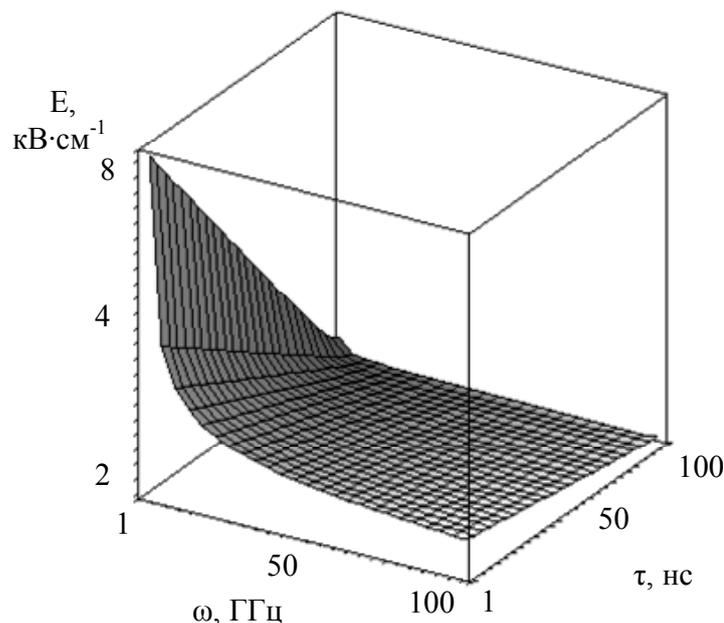


Рис. 1 – Влияние характеристик импульса МЭМИ (ω и τ) на критическую напряженность поля (E)

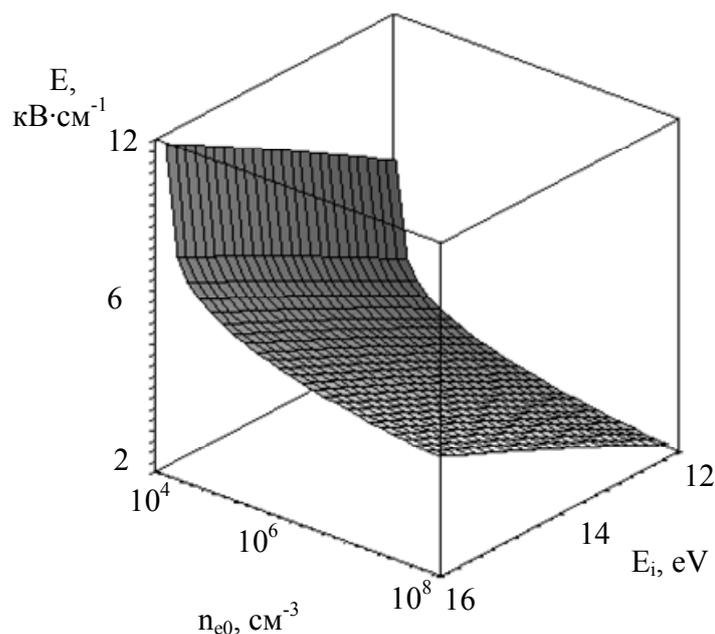


Рис. 2 – Влияние характеристик среды (E_i и n_0) на критическую напряженность поля (E) при ионизации молекул кислорода в воздухе

Из характеристик среды наибольшее влияние на увеличение критической напряжённости поля оказывает концентрация свободных электронов (рис. 2), поэтому необходимо обязательно проводить мониторинг этого параметра при использовании СВЧ-излучения при решении задач искусственного осадкообразования для тушения ландшафтных пожаров.

Полученные данные позволяют определить распределения критической напряженности поля для различных высот атмосферы в безоблачную погоду (низкая концентрация крупных аэрозольных частиц) в зависимости от различных параметров СВЧ импульса (τ , ω) (рис. 3, 4)

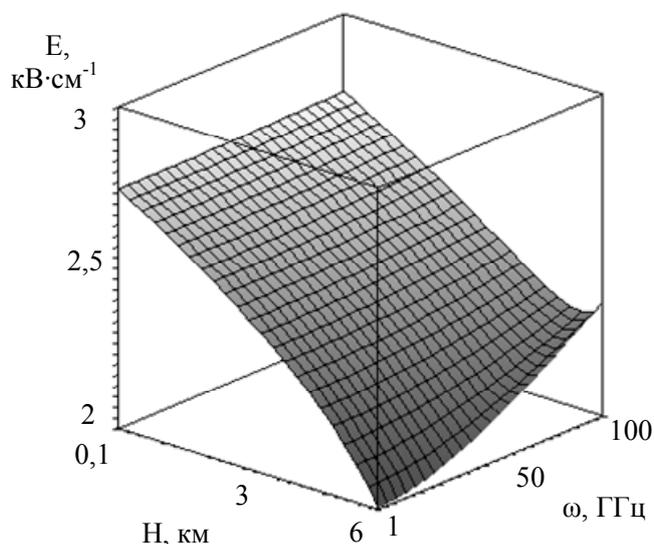


Рис. 3 – Зависимость критической напряженности поля (E) от высоты области воздействия (H) при $\tau = 5 \cdot 10^{-8}$ с

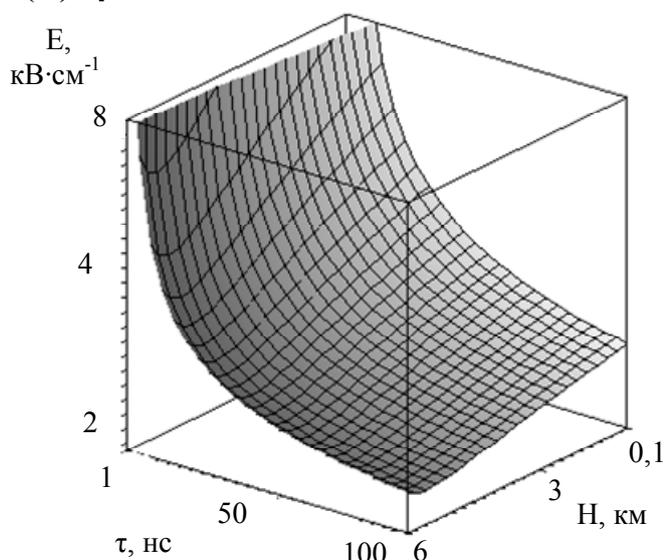


Рис. 4 – Зависимость критической напряженности поля (E) от высоты области воздействия (H) при $\omega = 10^{10}$ с⁻¹

Анализ полученных данных показывает, что критическая напряжённость поля падает с высотой, пока частота соударений не достигнет того же порядка, что и ω . При малых высотах влияние частоты излучения на величину E , из-за высокой частоты соударений электронов с нейтральными молекулами, незначительно. Резкий рост критической напряжённости поля, при малой длительности импульса, объясняется тем, что свободные электроны за такое время воздействия поля не успевают приобрести энергию, достаточную для ионизации. Интенсификация процесса каплеобразования в атмосфере путем активного воздействия на неё мощного электромагнитного излучения

зации нейтральной молекулы, что предполагается в модели (8).

Полученные в работе данные могут быть использованы для определения необходимых характеристик излучателей МЭМИ. Однако, при оценке возможности создания в атмосфере ионизированной области наземными источниками СВЧ излучения существенную роль играет учёт коэффициента ослабления излучения с расстоянием. Приведенная выше зависимость (4) не позволяет в полной мере определить потери мощности излучения, так как не учитывает присутствие в атмосфере твёрдых и жидких аэрозольных частиц, которые вносят существенный вклад в процесс рассеивания и поглощения МЭМИ.

Выводы. В работе рассмотрено влияние концентрации лёгких ионов и свободных электронов на интенсификацию процесса осадкообразования в зоне ЧС. Подтверждено предположение о влиянии ионизации воздуха на процессы конденсации атмосферных водосодержащих аэрозолей. По результатам анализа существующих методов ионизации воздуха наиболее эффективным определён метод воздействия на область ионизации пучков МЭМИ СВЧ диапазона. Результаты проведенных в работе расчётов с дополнительным учётом коэффициента ослабления излучения позволяют оценить характеристики излучателей МЭМИ для образования ионизированной области в атмосфере.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гинзбург А.С. Влияние естественных и антропогенных аэрозолей на глобальный и региональный климат / А.С. Гинзбург, Д.П. Губанова, В.М. Минашкин // Рос. хим. ж. (Ж. Рос. хим. об-ва им. Д.И. Менделеева). – 2008. - т. LII, № 5 - С. 112-119.

2. Израэль Ю.А. Метеорология и гидрология / Ю.А. Израэль, 2005. - № 10. - С. 5—9.

3. Ивлев Л.С. Химический состав и структура атмосферных аэрозолей / Л.С. Ивлев // Л., Изд. ЛГУ, 1982. - 366 с.

4. Мейсон Б. Дж. Физика облаков / Б. Дж. Мейсон. - Л.: Гидрометеиздат, 1961. - 541 с.

5. Кустов М.В. Исследование механизма каплеобразования при тушении пожаров атмосферными осадками / М.В. Кустов // Проблемы пожарной безопасности. – Х.: НУГЗУ, 2011. – Вып.. 30. – С. 139-146.

6. Аэрозоль и климат. [Под ред. К.Я.Кондратьева]. Л., Гидрометеиздат, 1991. - 541 с.

7. Кондратьев К.Я. Атмосферный аэрозоль / К.Я. Кондратьев, Н.И. Москаленко, Д.В. Поздняков. // Л., Гидрометеиздат, 1983. - 224с.

8. Janicke R. Aerosol physics and chemistry. // In Landolf-Bernstein,

Numerical Data and Functional Relationships in Science and Technology. New Series. Group V, G.Fischer (Ed.), 1988, vol. 4, p. 391-457.

9. Ивлев Л.С. Физика атмосферных аэрозольных систем / Л.С. Ивлев, Ю.А. Довгалюк. — СПб.: НИИХ СПбГУ, 1999. — 194с.

10. Mallard G., Linstrom P.J. // NIST Standard Reference Database. 2000. Vol. 69.

11. Гуревич А.В. Ионизированный слой в газе / А.В. Гуревич // Успехи физических наук, 1980, Т. 132, в. 4, - С. 685 – 690.

12. Иванов О.А. Физико-химические процессы в плазме наносекундных СВЧ разрядов: дис. ... доктора физ.-мат. наук: 01.04.08/ Иванов Олег Андреевич. – Нижний Новгород, 2007. – 352 с.

13. Гуревич А.В. Искусственная ионизированная область как источник озона в стратосфере / А.В. Гуревич, А.Г. Литвак, А.Л. Вихарев и др. // Успехи физических наук, 2000. – Т. 170, № 11. – С. 1181 – 1202.

14. Гуревич А.В. Нелинейная теория распространения радиоволн в атмосфере / А.В. Гуревич, А.Б. Шварцбург. – М.: Наука, 1973. – 322 с.

15. Барсов В.И. Оценка СВЧ пробоя в атмосфере при распространении в ней СВЧ импульса / В.И. Барсов, Н.С. Антоненко // Системи обробки інформації. – Х.: ХУПС, 2010. – Вип. 9(90). – С. 8-11.

nuczu.edu.ua

М.В. Кустов, В.Д. Калугін

Інтенсифікація процесу каплеутворення в атмосфері шляхом активного впливу потужним електромагнітним випромінюванням

Розглянуто вплив іонізації атмосфери в зоні активного опадоутворення на процес штучного впливу на атмосферні аерозолі з метою забезпечення необхідної кількості опадів для ліквідації різних НС. Проведено порівняльну оцінку різних методів іонізації газів при впливі на атмосферні аерозолі. Визначено необхідну напруженість електромагнітного поля для ефективною іонізації атмосфери.

Ключові слова: штучне опадоутворення, іон, іонізація газу, пучки мікрохвиль, НВЧ випромінювання, інтенсивність електромагнітного випромінювання, напруженість електричного поля.

M.V. Kustov, V.D. Kalugin

Intensification of drops formation process in atmosphere by active influence of powerful electromagnetic radiation

Influence of ionization of atmosphere in a zone of active formation of deposits on process of artificial influence on atmospheric aerosols on purpose maintenance of a necessary amount of precipitation for liquidation of various emergency situations is considered. The comparative estimation of various methods of ionization of gases is spent at influence on atmospheric aerosols. Necessary intensity of an electromagnetic field for effective ionization of atmosphere is defined.

Keywords: artificial formation of deposits, an ion, gas ionization, bunches of microwaves, the microwave radiation, intensity of electromagnetic radiation, intensity of electric field.