

*М.В. Кустов, канд. техн. наук, В.Д. Калугин, д-р хим. наук, профессор
(Национальный университет гражданской защиты Украины)*

ВЛИЯНИЕ МЕЖЧАСТИЧНЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ НА ПРОЦЕСС ОСАДКООБРАЗОВАНИЯ В ИСКУССТВЕННО ИОНИЗИРОВАННОЙ ОБЛАСТИ АТМОСФЕРЫ

Исследована кинетика межмолекулярного взаимодействия молекул воды и ион-дипольного взаимодействия ионизированных молекул кислорода с молекулами воды, как в свободном состоянии, так и в связанном состоянии на поверхности капли. Рассмотрена модель влияния данных видов межчастичных взаимодействий на процессы искусственного каплеобразования в поляризованной атмосфере.

Ключевые слова: искусственная ионизация, центры конденсации, межмолекулярное взаимодействие, ион-дипольное взаимодействие, влажность атмосферы, атмосферные осадки.

Постановка проблемы. Необходимым условием тушения крупных ландшафтных пожаров является обеспечение подачи большого количества огнетушащего вещества (в основном воды) с достаточной интенсивностью. Так как масштабы таких пожаров велики, то обеспечение данного условия с помощью существующих технических средств представляет сложную задачу. Достаточное количество воды, как огнетушащего вещества, содержится в атмосфере Земли. Так как природные осадки во время ликвидации пожара над зоной горения маловероятны, то вопрос искусственного инициирования осадков является актуальной проблемой. Одним из путей решения данной проблемы является инициирование процесса создания заряженных центров конденсации (ионов) в атмосфере за счет воздействия электромагнитного СВЧ излучения. Исходя из этого, одной из проблем, подлежащих разрешению, является исследование кинетики различных видов межчастичных взаимодействий ионов с молекулами воды в различном энергетическом состоянии и влияние данных взаимодействий на процесс каплеобразования в атмосфере с различной влажностью.

Анализ последних достижений и публикаций. Для тушения крупных ландшафтных пожаров необходимо 3-5 тыс. тонн воды [1]. Так как зачастую сил и средств на тушение не хватает, все действия направлены не на тушение, а на локализацию подобных пожаров. При этом в атмосфере при влажности 60 % содержится $0,01 \text{ т/м}^2$, а в облачных образованиях до $0,2 \text{ т/м}^2$ [2-3]. Для искусственной стимуляции осадкообразования в необходимом районе на сегодняшний день получил распространение метод засева облаков химически активными ядрами конденсации (соли йода) с помощью авиации [4-5]. Исходя из этого в [6] разработана методика засева облаков данным способом при тушении лесных пожаров. Однако способ засева облаков химическими реактивами требует применения дорогостоящей техники (самолётов) и имеет ряд ограничений по влагозапасу облака, температуре, метеоусловиям для работы авиации и др. В работах [7-8] для интенсификации осадкообразования нами предлагается создавать над зоной тушения пожара ионизированную область путём воздействия на атмосферу электромагнитного СВЧ излучения. Вопрос об искусственной ионизации атмосферы СВЧ излучением рассмотрен в работах [9-11]. Однако процессы каплеобразования в этих условиях существенно зависят от влажности и температуры атмосферы. Кинетика конденсации пара на ядрах, в зависимости от этих параметров, описана в работах [12-13], однако при рассмотрении роли заряженных ядер в данных работах учитывается влияние только электростатических сил на давление насыщения над поверхностью ядра, тогда как межмолекулярное взаимодействие, в данном случае, становится определяющим фактором физико-химического процесса конденсации.

Постановка задачи и ее решение. Целью работы является определение влияния межчастичного (межмолекулярного, ион-дипольного) взаимодействия на процесс конденсации воды на заряженном ядре в условиях электромагнитного СВЧ-облучения зоны атмосферы.

Исходим из представления, что протекание процесса конденсации определяется соотношением свободной энергии (или энергии Гиббса) пара (G_{II}) и конденсированной фазы воды (G_B) [14]. Так как система стремится к более энергетически выгодному состоянию, то при $G_{II} > G_B$ ($\Delta G < 0$) происходит конденсация пара, а при $G_{II} < G_B$ ($\Delta G > 0$) соответственно, испарение жидкости.

В равновесном состоянии свободные энергии равны:

$$G_B = G_{II} \rightarrow dG_B = dG_{II}. \quad (1)$$

Для гомогенной конденсации термодинамический потенциал для воды и пара определяется как [2, 4]:

$$G_B = U_B + P_H \cdot v_B - T \cdot s_B, \quad (2)$$

$$G_{II} = U_{II} + P_H \cdot v_{II} - T \cdot s_{II}, \quad (3)$$

где U_B, U_{II} – внутренние энергии воды и пара соответственно, Дж;

P_H – давление насыщенного водяного пара, Па;

v_B, v_{II} – удельные объемы воды и пара соответственно, $\text{м}^3 \cdot \text{кг}^{-1}$;

T – температура воды и пара (в равновесном состоянии $T_B = T_{II} = T$), К;

s_B, s_{II} – энтропии воды и пара соответственно, $\text{Дж} \cdot \text{К}^{-1}$.

Используя закон сохранения энергии (первое начало термодинамики) и второе начало термодинамики для обратимых процессов из (1-3), получаем уравнение Клаузиуса-Клапейрона [15]:

$$\frac{dP_n}{dT} = \frac{s_{II} - s_B}{v_{II} - v_B}. \quad (4)$$

При изотермическом процессе:

$$s_{II} - s_B = \frac{L}{T}, \quad (5)$$

где L – удельная теплота конденсации (парообразования), Дж/кг.

Учитывая выражение (5), уравнение состояния водяного пара, а также то, что удельный объем, пара гораздо больше удельного объема воды ($v_B \ll v_{II}$), интегрирование уравнения (4) даёт результат:

$$\ln S_0 = \ln \frac{P_n}{P_0} = \frac{L \cdot M}{R} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right), \quad (6)$$

где S_0 – степень пересыщения пара относительно давления насыщения при 0°C ;

M – молярная масса воды, $M = 0,018 \text{ кг} \cdot \text{моль}^{-1}$;

R – универсальная газовая постоянная, $\text{Дж} \cdot \text{моль}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$;

P_0 – давление насыщенного водяного пара при 0°C , $P_0 = 610,78 \text{ Па}$;

$T_0 = 273,15 \text{ К}$. Соответственно, степень пересыщения пара, необходимая для протекания процесса конденсации, будет определяться:

$$S_0 = \exp \left[\frac{L \cdot M}{R_0} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right) \right]. \quad (7)$$

При рассмотрении гетерогенной нуклеации на поверхности жидкой капли необходимо учесть поверхностные силы. В этом случае свободная энергия пара определяется суммой энергий молекул g_{II} :

$$G_{II} = g_{II} \cdot n. \quad (8)$$

Свободная энергия воды кроме энергии молекул также зависит и от энергии поверхностного натяжения:

$$G_B = g_B \cdot n + 4\pi \cdot r^2 \cdot \sigma, \quad (9)$$

где r – радиус капли (ядро конденсации), на которую конденсируется пар, м;

σ – коэффициент поверхностного натяжения, $\text{Дж} \cdot \text{м}^{-2}$.

Разница свободных энергий пара и конденсированной воды имеет экстремум по радиусу капли – $r_{кр}$, который достигается при условии: $\left[\frac{d(\Delta G)}{dr} = 0 \right]$, и рассчитывается согласно:

$$r_{кр} = \frac{2\sigma \cdot M}{\rho \cdot N_A \cdot k \cdot T \cdot \ln S}, \quad (10)$$

где S – степень пересыщения пара относительно давления насыщения при той же температуре без капель;

k – постоянная Больцмана, $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж·К⁻¹;

N_A – число Авогадро, $N_A = 6,022 \cdot 10^{23}$ моль⁻¹;

ρ – плотность воды, кг·м⁻³.

Как было отмечено выше, экстремум ΔG определяет возможность протекания конденсации либо испарения. Следовательно при размерах капли больше $r_{кр}$ на ней будет конденсироваться пар, в противоположном случае (при $r < r_{кр}$) капля сама будет испаряться.

Принимая условие (1) Томпсон [15] предложил следующую формулу для определения необходимой степени пересыщения для конденсации пара на жидкой капле воды:

$$S_r = \exp\left(\frac{2\sigma \cdot M}{\rho \cdot N_A \cdot k \cdot T \cdot r}\right). \quad (11)$$

В случае, когда ядро конденсации обладает электрическим зарядом, его энергетический вклад в общий потенциал каплеобразования, в соответствии с [14, 15] определяется по выражению:

$$f_q = \frac{q^2}{8\pi \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot r_q}, \quad (12)$$

где q – заряд ядра конденсации, Кл;

ε – относительная диэлектрическая проницаемость атмосферы;

ε_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума, $\varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$ Ф·м⁻¹;

r_q – радиус заряженного ядра, м.

Соответственно критическая степень пересыщения пара при условии, что ядро обладает электрическим зарядом (пример для заряженной капли воды) определяется:

$$S_q = \exp\left\{\frac{M}{\rho \cdot N_A \cdot k \cdot T} \left[\left(\frac{2\sigma}{r}\right) - \left(\frac{q^2}{32\pi^2 \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot r_q^4}\right) \right]\right\}. \quad (13)$$

При анализе выражения (13) видим, что при тех значениях электрического заряда ядра ($q \sim 10^{-18}$ Кл) и его размерах ($r_q \sim 10^{-9}$ м), которые характерны для ионов в атмосфере, влияние заряда на процесс конденсации незначительно. Однако Вильсон [16, 17] ещё в конце XIX века экспериментально показал усиление процесса активной конденсации на ионах. В дальнейшем данный процесс неоднократно был подтвержден в работах [18, 19]. Расхождение наших расчётов с данными [16–19] можно объяснить тем, что в выражении (13) учитывается только влияние электростатического поля на давление насыщения над поверхностью, тогда как в данном случае необходимо учитывать, межмолекулярные силы взаимодействия заряженного иона и молекулы воды, которые достаточно велики и поэтому ими нельзя пренебрегать.

Для рассмотрения кинетики межмолекулярного взаимодействия при искусственной конденсации водяного пара первоначально необходимо определить, какие ионы будут взаимодействовать с молекулами воды. Так как мы рассматриваем процесс ионизации воздуха электромагнитным СВЧ излучением, то ионизация происходит за счёт сообщения объёму воздуха электромагнитной энергии. Из основных компонент воздуха атмосферы Земли наименьшей степенью ионизации обладает кислород (табл. 1) [20].



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
H_2O^+/H_2O	12,621±0,002
CO_2^+/CO_2	13,777±0,001
Ar^+/Ar	15,759±0,001
Kr^+/Kr	13,999±0,00001

Естественно, по причине неоднородности поля и среды будет происходить ионизация и других составляющих воздуха, однако концентрация таких ионов будет значительно ниже концентрации O_2^+ , следовательно, в дальнейшем будем рассматривать объем с равномерным распределением молекул H_2O и заряженных частиц: O_2^+ , e^- (рис. 1), что справедливо для небольшой степени пересыщения водяного пара.

Энергия взаимодействия иона (O_2^+) и диполя, которой является молекула воды, определяется, согласно [21], выражением:

$$U_{u-d} = \frac{1}{4\pi \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0} \cdot \frac{q_u \cdot \mu_d}{l^2} \cdot \cos \theta, \quad (15)$$

где q_u – заряд иона, Кл;

μ_d – дипольный момент молекулы воды, Кл·м;

l – расстояние между ионом и диполем, м;

θ – угол, образованный осью между ионом и центром диполя и осью диполя.

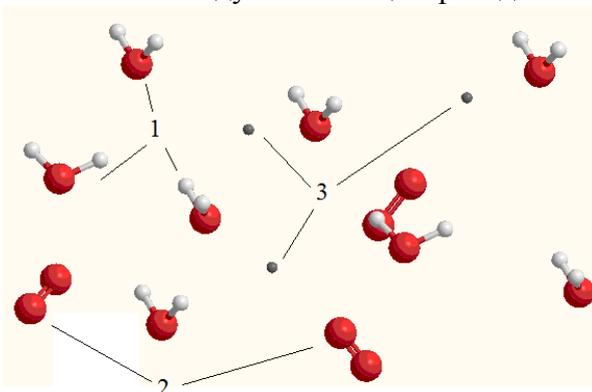


Рис. 1. Схематическое изображение распределённых по объёму основных участников межчастичного взаимодействия (1 – H_2O , 2 – O_2^+ , 3 – e^-)

С учётом выражения (15), свободная энергия водяного пара (8) примет вид:

$$G_{\Pi} = (g_{\Pi} + U_{i-d}) \cdot n. \quad (16)$$

Соответственно, критическая степень пересыщения для конденсации пара на ионе ($q_i=q$) определяется как:

$$S_u = \exp \left\{ \frac{M}{\rho \cdot N_A \cdot k \cdot T} \left[\left(\frac{2\sigma}{r} \right) - \left(\frac{q^2}{32\pi^2 \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot r^4} \right) - \left(\frac{\rho \cdot N_A \cdot q \cdot \mu_d}{4\pi \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot l^2 \cdot M} \cdot \cos \theta \right) \right] \right\}. \quad (17)$$

Как показали расчёты, учёт ион-дипольного взаимодействия по (17) существенно снижает расчётное значение критической степени пересыщения при конденсации на ионах, поэтому расхождение между теоретическим расчётом и экспериментальными данными снижается.

Для полноты картины необходимо заметить, что существует ещё один энергетический барьер каплеобразования, который определяется величиной критического радиуса капли (10). Даже с учётом (17), $r_{кр}$ намного больше радиуса иона $r_{и}$, и поэтому первичное присоединение ионом молекул воды определяется несколько иными процессами.

Взаимодействие иона с другими молекулами называется сольватацией или в случае молекул воды – гидратацией иона. Рассмотрим радиус первичного кластера молекул воды на катионе O_2^+ . Образование катионных аквакомплексов объясняется донорно-акцепторным взаимодействием катиона с молекулами воды, а анионных – водородными связями [22]. Эти процессы являются основой первичной гидратации. Аквакомплексы также гидратированы за счёт водородных связей. Количество фрагментов гидратации и определяет радиус первичного кластера.

Молекулы воды вокруг иона экранируют его электрические силы, соответственно отдельный аквакомплекс является нейтральным, однако в электрическом поле происходит деформация оболочки аквакомплекса [23], а образование у аквакомплекса поляризационного заряда способствует его дальнейшему росту. Как уже отмечалось выше, в данной работе мы рассматриваем процессы ионизации и конденсации под действием электромагнитного СВЧ излучения, соответственно, рассмотрим образование и рост аквакомплексов в высокочастотном электрическом поле.

Согласно теории Дебая-Хюккеля [22] основными характеристиками, определяющими размеры надмолекулярного образования – кластера, являются электрический потенциал и его распределение вокруг иона.

К распределению заряда вокруг иона можно применить уравнение Пуассона, связывающее плотность заряда с потенциалом:

$$\nabla^2 \varphi(r) = -4\pi\rho(r)/\varepsilon, \quad (18)$$

где ∇^2 – оператор Лапласа;

φ – потенциал, eV;

$\rho(r)$ – плотность заряда в точке r , для которой вычисляется потенциал.

Плотность заряда $\rho(r)$ в уравнении (18) является разностью между количеством положительных и отрицательных зарядов в единице объема, находящихся на расстоянии r от центрального иона. Для условий атмосферы Земли, когда концентрация ионов относительно низкая, потенциал становится пренебрежимо малым на расстояниях, меньших расстояния между наиболее близко расположенными ионами. В этих условиях плотность заряда $\rho(r)$ фактически является плотностью поляризационного заряда, образованного поляризацией молекул воды.

Количество поляризованных молекул воды, имеющих потенциал ψ , как в случае катионов, так и в случае анионов, определяется уравнением Больцмана:

$$n_{пол} = \bar{n} \cdot \exp\left(-\frac{U_\varphi}{kT}\right), \quad (19)$$

где \bar{n} – среднее число молекул воды в единице объёма атмосферы;

U_φ – энергия молекул воды при соответствующем потенциале φ .

Тогда энергия поляризованных молекул воды определяется выражением:

$$U_{H_2O} = q_{H_2O} \cdot \varphi, \quad (20)$$

где q_{H_2O} – поляризационный заряд молекулы, Кл.

Поляризационный заряд молекулы пропорционален заряду иона, а значение заряда иона определяется количеством молекул воды, которые выстраиваются на линии, соединяющей ион и рассматриваемую молекулу, и экранируют электрическое поле иона.

Из основных положений электростатики плотность поляризационного заряда молекулы определяется соотношением:

$$\rho_{пол} = -\nabla \vec{P}, \quad (21)$$

в котором вектор поляризации \vec{P} связан с вектором напряжённости электрического поля \vec{E} , созданного ионом, следующим выражением:

$$\vec{P} = \chi \varepsilon_0 \vec{E}, \quad (22)$$

где χ – диэлектрическая восприимчивость диэлектрика.

Ион в среде диэлектрика создает электрическое поле, напряженность которого векторная величина и описывается как:

$$\vec{E} = \frac{q \cdot \vec{r}}{4\pi \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot r^3}, \quad (23)$$

где \vec{r} – радиус-вектор, начало которого совпадает с геометрическим центром иона;
 r – расстояние до центра иона, м.

Учитывая, что радиальная компонента вектора напряженности электрического поля составляет:

$$E_r = \frac{q}{4\pi \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot r^2}, \quad (24)$$

получаем решение уравнения (21), которое имеет вид:

$$\rho_{пол} = \frac{\chi \cdot q}{2\pi \cdot \varepsilon \cdot r^3}. \quad (25)$$

В электрическом поле иона происходит два процесса: во-первых, индуцируется добавочный дипольный момент из-за сил, действующих на электроны; во-вторых, электрическое поле стремится ориентировать отдельные молекулы, создавая результирующий, отличный от нуля, момент в единице объема. Учитывая, что энергия диполя в электрическом поле определяется как $U_d = -\vec{\mu}_b \vec{E}$, в работах [24-25] получено решение уравнения Пуассона в виде:

$$\nabla^2 \psi = -\frac{2}{3} \cdot \frac{\bar{n} \cdot \mu_b \cdot q}{(\varepsilon \cdot \varepsilon_0)^2} \cdot \frac{1}{r_{кл}^3}, \quad (26)$$

где $r_{кл}$ – радиус кластера воды, сформировавшегося на ионе, м.

Полученное решение согласуется с положениями теории Дебая-Хюккеля. Граничные условия уравнения (26) для рассматриваемого в работе случая запишутся как:

$$\psi(r_{кл} = r_0) = \psi_0; \quad \psi(r_{кл} \rightarrow \infty) = 0, \quad (27)$$

где r_0 – радиус иона, м.

Дополнительным граничным условием является критическая напряжённость поля, при которой молекулы воды за счёт диполь-дипольного взаимодействия образуют молекулярные мостики [26], что и приводит к росту кластера в соответствии с уравнением:

$$E_{кр} = \frac{1}{\alpha_b} \cdot \left(\sqrt{\mu_b^2 + 2\alpha \cdot k \cdot T} - \mu_b \right), \quad (28)$$

где α_b – поляризуемость молекулы воды.

Уравнение (26) с учётом (27-28) решали методом Монте-Карло по стандартному алгоритму Метрополиса [27] с помощью программного обеспечения HyperChem. По результатам расчётов для $T=273$ К радиус водяного кластера на ионе O_2^+ составляет 0,137 мкм. Таким образом, учитывая, что критический радиус жидкой капли для протекания конденсации пара на её поверхности, согласно (10), составляет порядка 10^{-8} м ($r_{кр} < r_{кл}$), образование аквакомплекса на ионе позволяет перейти первичный энергетический барьер образования жидкой капли.

При взаимодействии иона с уже образовавшейся каплей в результате первичной конденсации на ионе, либо в результате воздействия СВЧ излучения на заранее сформировавшееся облако, происходит накопление заряда на поверхности капли.

Взаимодействие заряженных капель в атмосфере можно рассматривать как классическое кулоновское взаимодействие заряженных сфер, пренебрегая межмолекулярным взаимодействием по причине их малости в масштабах капли, т.е. коагуляция происходит только при взаимодействии разноимённо заряженных капель. Однако в большинстве случаев в каплях больших размеров ($r > 10^{-6}$ м) заряды по поверхности капли распределены неравномерно [2-4] (рис. 2).

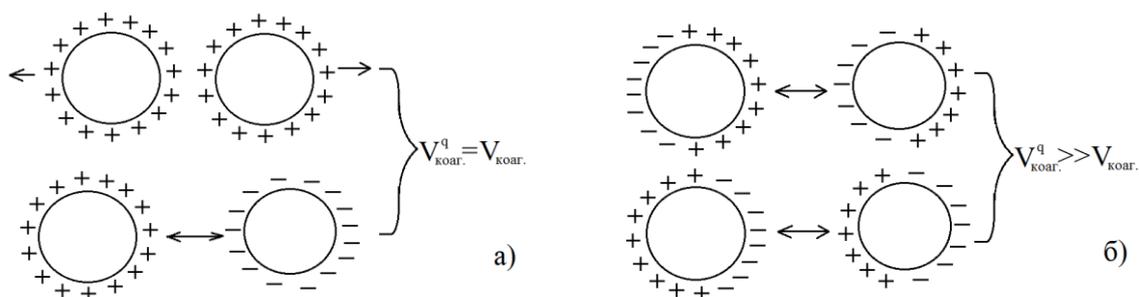


Рис. 2. Взаимодействие заряженных капель аэрозоля с равномерным (а) и неравномерным (б) распределением заряда по поверхности

Неравномерное распределение заряда по поверхности капли увеличивает вероятность слияния капель в объеме, а, следовательно, и увеличивает скорость коагуляции аэрозоля в целом.

Выводы. В работе учтена энергия ион-дипольного взаимодействия в выражении общей свободной энергии водяного пара, что позволило более достоверно рассчитать теоретическое значение критической степени пересыщения пара, при которой начинается конденсация на заряженном ядре. На основе теории аквакомплексов рассчитан радиус первичного водяного кластера на ионе. Показано, что размеры гидратированного иона превышают критические размеры жидкого ядра конденсации, что позволяет преодолеть самый энергоёмкий этап конденсации пара – образование жидкого ядра конденсации. Полученные результаты подтверждают возможность эффективного использования искусственного ионизирования области атмосферы с целью интенсификации процесса осадкообразования для тушения ландшафтных пожаров.

Список литературы:

1. Курбатский Н.П. Техника и тактика тушения лесных пожаров/ Н.П. Курбатский – М.: Гослесбумиздат, 1962. – 154 с.
2. Ивлев Л.С. Физика атмосферных аэрозольных систем / Л.С. Ивлев, Ю.А. Довгалоук. – СПб.: НИИХ СПбГУ, 1999. — 194с.
3. Шметер С.М. Физика конвективных облаков / С.М. Шметер. – Л.: Гидрометеиздат, 1972. – 231 с.
4. Качурин Л.Г. Физические основы воздействия на атмосферные процессы / Л.Г. Качурин // Л.: Гидрометеиздат, 1990. – 463 с.
5. Проведение работ по искусственному увеличению осадков самолётным методом. Методические рекомендации: РД 52.11.637-2002. – [Действительный с 2003-01-01]. – Росгидромет. – СПб.: Гидрометеиздат, 2002. – 4 с. – (Руководящий документ).
6. Порядок проведения работ по искусственному вызыванию осадков из конвективных облаков при борьбе с лесными пожарами с борта легкомоторных воздушных судов. Инструкция: РД 52.04.628-2001. – [Действительный с 2002-03-01]. – Росгидромет. – СПб.: Гидрометеиздат, 2002. – 18 с. – (Руководящий документ).
7. Кустов М.В. Интенсификация процесса каплеобразования в атмосфере путём активного воздействия на неё мощного электромагнитного излучения/ М.В. Кустов, В.Д. Калугин// Проблемы пожарной безопасности. – Х.: НУГЗУ, 2012. – Вып. 31. – С. 139-146.
8. Кустов М.В. Исследование процессов искусственной стимуляции осадков при частичной ионизации атмосферы электромагнитным излучением / М.В. Кустов, Б.Б. Поспелов // Проблемы надзвичайних ситуацій. – Х.: НУЦЗУ, 2013. – Вып. 17. – С. 72-81
9. Борисов Н.Д. Искусственная ионизированная область в атмосфере / Н.Д. Борисов, А.В. Гуревич, Г.М. Милих. – М.: ИЗМИРАН, 1986. – 348 с.

- 10. Гуревич А.В.** Искусственная ионизированная область как источник озона в стратосфере/ А.В. Гуревич, А.Г. Литвак и др. // Успехи физических наук, 2000. – Т. 170, № 11. – С. 1181 – 1202.
- 11. 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.
- 12. Стромберг А.Г.** Физическая химия / А.Г. Стромберг, Д.П. Семченко // М.: Высшая школа, 1999. – 527 с.
- 13. Куни Ф.М.** Теория гетерогенной нуклеации в условиях постепенного создания метастабильного состояния пара / Ф.М. Куни, А.К. Щекин, А.П. Гринин // УФН, 2001. – Т. 171, № 4. – С. 345-385.
- 14. Куни Ф.М.** К теории зародышеобразования на заряженных ядрах. 2. Термодинамические параметры равновесного зародыша / Ф.М. Куни, А.К.Щекин, А.И.Русанов // Коллоидный журн, 1982. - Т.44. №.6. - С.1062-1068.
- 15. Мейсон Б.Дж.** Физика облаков / Б.Дж. Мейсон // Л.: Гидрометиздат, 1962. – 541 с.
- 16. Wilson C.T.R.** Condensation of water vapor in the presence of dust free air and other gases / C.T.R. Wilson // Phil. Trans. Roy. Soc., 1897. – № 189. – P. 265.
- 17. Wilson C.T.R.** On the comparative efficiency as condensation nuclei of positively and negatively charged ions / C.T.R. Wilson // Phil. Trans. Roy. Soc., 1899. – № 193. – P. 289.
- 18. Scharrer L.** Condensation of supersaturated vapor on ions / L. Scharrer // Ann. d. Physik, 1939. – №35. – P. 619.
- 19. Палей А.А.** Исследование процессов конденсации паров на электрически заряженных аэрозольных частицах / А.А. Палей, В.Б. Лапшин, Н.В. Жохова, В.В. Москаленко // Электронный научный журнал «Исследовано в России» - <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2007/027.pdf>.
- 20. Mallard G., Linstrom P.J.** // NIST Standart Reference Database. 2000. Vol. 69.
- 21. Семиохин И.А.** Кинетика химических реакций / И.А. Семиохин, Б.В. Страхов, А.И. Осипов // М.: Изд-во МГУ, 1995. – 351 с.
- 22. Салем Р.Р.** Теоретическая электрохимия/ Р.Р. Салем// М.: Вузовская книга, 2012.– 326 с.
- 23. Бойко В.И.** Эффекты, вызванные действием асимметричного электрического поля высокой частоты на водные растворы солей / В.И. Бойко, М.А. Казарян, И.В. Шаманин, И.В. Ломов // Краткие сообщения по физике ФИАН, 2005. – № 7. – С. 28–37.
- 24. Бойко В.И.** Оценка размеров сольватной оболочки катионных аквакомплексов в растворах солей / Бойко В.И., Казарян М.А., Шаманин И.В. и др. // Известия Томского политехнического университета, 2006. – Т. 309., № 4. – С. 81-85.
- 25. Казарян М.А.** Физические модели и приложения процесса сольватации ионов в растворах солей в полярных диэлектриках / М.А. Казарян, И.В. Ломов, И.В. Шаманин // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология», 2007. – № 11(55). – С. 150-159.
- 26. Неволин В.К.** Физические основы туннельно-зондовой нанотехнологии / В.К. Неволин // Электронная промышленность. – 1993. – № 10. – С. 8–15.
- 27. Allen M.P.** Computer Simulation of Liquids / M.P. Allen, D. Tildesley // Clarendon Press, Oxford, 1987.

ВПЛИВ МІЖЧАСТКОВИХ ВЗАЄМОДІЙ НА ПРОЦЕС ОПАДОУТВОРЕННЯ В ШТУЧНО ІОНІЗОВАНІЙ ОБЛАСТІ АТМОСФЕРИ

Досліджена кінетика міжмолекулярної взаємодії молекул води та іон-дипольної взаємодії іонізованих молекул кисню з молекулами води, як у вільному стані, так і в зв'язаному стані на поверхні краплі. Розглянута математична модель впливу даних видів міжчасткових взаємодій на процеси штучного краплеутворення в поляризованій атмосфері.

Ключові слова: штучна іонізація, центри конденсації, міжмолекулярна взаємодія, іон-дипольна взаємодія, вологість атмосфери, атмосферні опади.

M.V. Kustov, V.D. Kalugin

INTERPARTICLES INFLUENCE ON SEDIMENTATION PROCESS IN ARTIFICIALLY IONIZED ATMOSPHERIC AREA

The kinetics of water molecules intermolecular interaction and ion-dipolar interaction of the ionized molecules of oxygen with water molecules, both in a loose condition and in the localized state on a drop surface is investigated. Influence of these interparticle interactions on artificial tear-drop processes in the atmosphere is considered.

Keywords: artificial ionization, condensation centers, intermolecular interaction, ion-dipolar interaction, atmospheric moisture, an atmospheric precipitation

