

М.В. Кустов, к.т.н., зам. нач. каф., НУГЗУ

ВЛИЯНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ ИОНОВ В АТМОСФЕРЕ НА ИНТЕНСИВНОСТЬ ОСАДКОВ НАД ЗОНОЙ ВЫБРОСА ОПАСНЫХ ВЕЩЕСТВ

(представлено д-ром техн. наук Тарасенко А.А.)

Аналитически рассмотрено влияние концентрации ядер каплеобразования и относительной влажности воздуха на скорость коагуляции и испарения воды в процессе осадкообразования в атмосфере.

Ключевые слова: вымывание веществ из атмосферы, свободные ионы, ядра конденсации, степень пересыщения, коагуляция, интенсивность осадков.

Постановка проблемы. При авариях на предприятиях использования и переработки радиоактивных и химически опасных материалов происходит выброс опасных веществ в верхние слои атмосферы, что приводит к значительной зоне загрязнения. Существенно снизить зону распространения радиоактивных и химически опасных веществ позволяют атмосферные осадки. Искусственное инициирование и интенсификация осадков возможна за счёт введения активных центров каплеобразования. Наиболее активными центрами каплеобразования в атмосфере являются заряженные частицы (ионы). Исходя из этого, одной из проблем подлежащих разрешению, является определение достаточной концентрации атмосферных ионов для искусственного инициирования осадкообразования в атмосфере.

Анализ последних исследований 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 конденсации ионов [1, 3-5]. Однако вопрос установления влияния их концентрации на интенсивность осадков остается нерешённым.

Постановка задачи и её решение. Целью работы является установление концентрационной зависимости интенсивности осадкообразования от ионного состава атмосферы над зоной выброса опасных радиоактивных и химических веществ.

В общем виде интенсивность осадков определяется влажностью воздуха в области осадкообразования и количеством первичных ядер конденсации:

$$\begin{aligned} \frac{dr}{d\tau} &= \left(\frac{dr}{d\tau} \right)_{kond} + \left(\frac{dr}{d\tau} \right)_{koag} = \\ &= \frac{D \cdot M \cdot P_{\infty}}{k \cdot N_A \cdot \rho \cdot T_{\infty} \cdot r} [S - S_{кр}] + \rho \int_{r_0}^r \frac{E(r, R) \cdot \eta(r, R) \cdot R^3}{3r^2} dR \end{aligned} \quad (1)$$

где r – радиус капли в момент времени τ , м; R – радиус капель-доноров, которые поглощаются более крупными каплями в результате коагуляции, м; D – коэффициент молекулярной диффузии водяного пара в воздухе, $\text{м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$; M – молярная масса воды, $M = 0,018 \text{ кг моль}^{-1}$; k – постоянная Больцмана, $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж} \cdot \text{К}^{-1}$; N_A – число Авогадро, $N_A = 6,022 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$; P_{∞} – давление насыщения водяного пара на достаточно большом расстоянии, Па; ρ – плотность воды, $\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$; T_{∞} – температура пара на достаточно большом расстоянии от капли, К; $n(r)$ – концентрация капель с радиусом r , м^{-3} ; $E(r)$ – коэффициент коагуляции нейтрального аэрозоля; $\eta(r)$ – функция распределения капель по размеру; $S_{кр}$ – критическая относительная влажность атмосферы, ниже которой происходит обратный процесс – испарение капли.

Как видно из (1) скорость роста капли и при конденсации и при коагуляции существенно зависит от размера самой капли, однако имеет различный характер зависимости. Графическая зависимость скорости каплеобразования от размеров капли представлена на рис. 1.

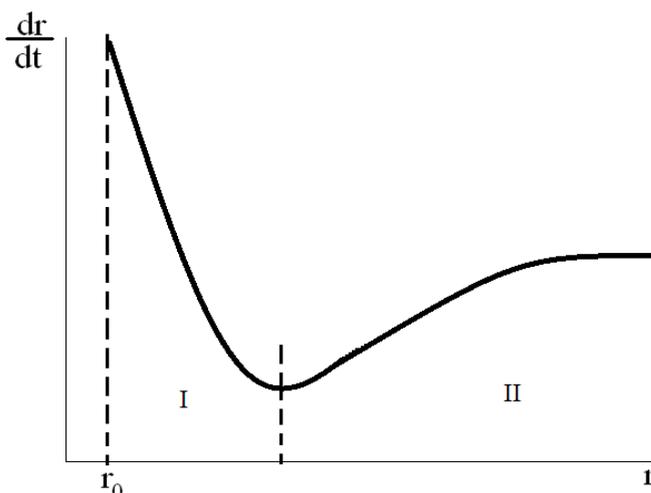


Рис. 1. Влияние размера капель на скорость каплеобразования

На рис. 1 видно, что если ядро конденсации не достигает определённого критического размера r_0 , то конденсация не происходит. Это связано с тем, что разница свободных энергий пара и конденсиро-

ванной воды имеет экстремум по радиусу капли $\left[\frac{d(\Delta G)}{dr} = 0 \right]$. Представленную на рис. 1 зависимость также можно разделить на два участка. Первому участку соответствует доминирующая роль процесса конденсации, а во втором участке начинает преобладать процесс коагуляции.

Однако в случае каплеобразования на ионе процесс конденсации можно разделить на две отдельных стадии. Во-первых, происходит образование начального кластера на ионе за счёт ион-дипольного взаимодействия с молекулами воды, и в этом случае критическая относительная влажность ($S_{кр}^i$) определяется из выражения [6]:

$$S_{кр}^i = \exp \left[\frac{M}{\rho \cdot N_A \cdot k \cdot T} \left(\frac{2\sigma}{r_{кл}} - \frac{q^2}{32\pi^2 \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot r_q^4} - \frac{\rho \cdot N_A \cdot q \cdot \mu_e}{4\pi \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot l^2 \cdot M} \cdot \cos\theta \right) \right], \quad (2)$$

где σ – коэффициент поверхностного натяжения, Дж·м⁻²; $r_{кл}$ – радиус первичного кластера воды, м; r_q – радиус заряженного ядра конденсации, м; 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; μ_e – момент диполя молекулы воды, Кл·м; l – расстояние между ионом и диполем, м; θ – угол, образованный осью между ионом и центром диполя и осью диполя.

Для ионов O_2^+ критическая относительная влажность составляет $S_{кр}^i = 0,47$, что является границей применения различных методов искусственного увеличения концентрации ионов для стимуляции осадкообразования в атмосфере. Для примера граница применения метода засева области атмосферы химически активными солями (AgI) составляет 0,6-0,75 и при этом воздействие возможно лишь на уже сформировавшиеся облака [1, 3, 7, 8].

Второй стадией является конденсация пара на поверхности водяного кластера. В этом случае влиянием иона можно пренебречь:

$$S_{кр}^e = \exp \left(\frac{2\sigma \cdot M}{\rho \cdot N_A \cdot k \cdot T \cdot r} \right). \quad (3)$$

В нормальных атмосферных условиях $S_{кр}^e \approx 1$, при которой обычно и наблюдаются осадки, однако при влажности воздуха меньше влажности насыщения ($S_{кр}^i < S < S_{кр}^e$), фоновой концентрации ионов недостаточно для инициирования осадков.

Это объясняется тем, что образовавшиеся в малом количестве капли с достаточным размером «выпадают» из зоны осадкообразования (облака) и в нижних слоях тропосферы попадают в зону с другими

термодинамическими параметрами (с меньшей влажностью и более высокой температурой) где происходит их испарение. В работе [9] нами рассмотрен процесс испарения капель при выпадении и установлено, что капли испаряются полностью в атмосфере не достигая поверхности земли до тех пор пока увеличение влажности нижней тропосферы не снизит скорость испарения. Таким образом, для того, что бы осадки достигали поверхности земли скорость роста капель в облаке должна превышать скорость испарения капель при выпадении.

При низких значениях влажности ($S_{кр}^i < S < S_{кр}^e$) влияние конденсации на скорость роста капель незначительно, а определяющую роль играет коагуляция первичных водяных кластеров. В формировании капель дождя в облаках наибольшую роль играет гравитационная коагуляция [10], физический смысл которой заключается в захвате мелких капель крупной при падении.

Таким образом, для определения минимальной концентрации ионов при которой будут наблюдаться осадки в условиях $S_{кр}^i < S < S_{кр}^e$ необходимо сравнить скорость коагуляции кластеров со скоростью испарения. Используя (1) и модель испарения капли [9] получаем графические зависимости, представленные на рис. 2. Здесь необходимо отметить, что представленная на рисунке зависимость скорости каплеобразования (пов. 1) рассчитывается для термодинамических параметров в зоне осадкообразования (облако). Тогда как скорость испарения капель зависит от термодинамических параметров той зоны атмосферы (ниже облака), которую пролетает капля при падении. Поэтому на рис. 2 представлена для сравнения скорость испарения капель (пов. 2) при постоянных термодинамических параметрах нижней тропосферы (степень пересыщения – 0,5; температура воздуха – 10°C).

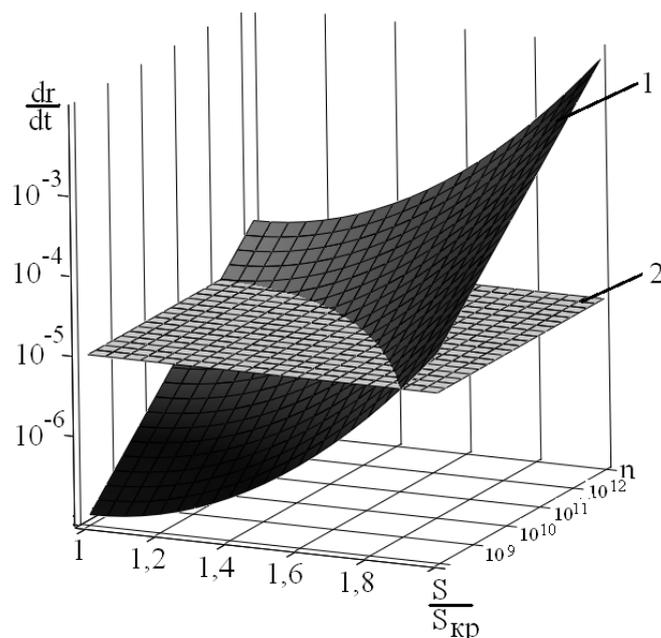


Рис. 2. Влияние концентрации ядер и относительной влажности на скорость коагуляции (пов. 1) и испарения (пов. 2)

Из рисунка 2 видно, что осадкообразование в условиях $S_{кр}^i < S < S_{кр}^6$ протекает при концентрации ионов не ниже $(10^{11}-10^{12}) \text{ м}^{-3}$ в зависимости от относительной влажности воздуха. Учитывая, что фоновая концентрация ионов в атмосфере составляет $(10^8-10^9) \text{ м}^{-3}$ [1], то для искусственного инициирования осадков необходимо увеличение концентрации ионов на 2-4 порядка.

Выводы. В работе рассмотрено влияние концентрации ядер каплеобразования на интенсивность совместного процесса конденсации пара и коагуляции капель в облаке. Полученные зависимости позволяют прогнозировать интенсивность осадков над зоной выброса опасных веществ в атмосферу с учётом их химических свойств и термодинамических характеристик атмосферы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ивлев Л.С. Физика атмосферных аэрозольных систем / Л.С. Ивлев, Ю.А. Довгалюк. – СПб.: НИИХ СПбГУ, 1999. – 194с.
2. Семенченко Б.А. Физическая метеорология / Б.А. Семенченко // М.: Аспект Прогресс, 2002. – 415 с.
3. Качурин Л.Г. Физические основы воздействия на атмосферные процессы / Л.Г. Качурин // Л.: Гидрометеиздат, 1990. – 463 с.
4. 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.
5. 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.aep.relarn.ru/articles/2007/027.pdf>.
6. Кустов М.В. Влияние межчастичных взаимодействий на процесс осадкообразования в искусственно ионизированной области атмосферы / М.В. Кустов, В.Д. Калугин // Пожежна безпека. – Львів: ЛДУБЖД, 2013. – №. 23. – С. 94-101.
7. Мейсон Б.Дж. Физика облаков / Б.Дж. Мейсон // Л.: Гидрометиздат, 1962. – 541 с.
8. 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).
9. Шаршанов А.Я. Моделирование атмосферных осадков для определения их противопожарного потенциала / А.Я. Шаршанов,

М.В. Кустов // Проблемы пожарной безопасности. – Харьков: НУГЗУ, 2013. – Вып. 34. – С. 186-193. – Режим доступа: <http://nuczu.edu.ua/sciencearchive/ProblemsOfFireSafety/vol34>.

10. Волошук В.М. Кинетическая теория коагуляции. Л.: Гидрометеиздат, 1984. – 284 с.

М.В. Кустов

Вплив концентрації іонів в атмосфері на інтенсивність опадів над зоною викиду небезпечних речовин

Аналітично розглянуто вплив концентрації ядер капле утворення та відносної вологості повітря на швидкість коагуляції та випаровування води в процесі опадоутворення в атмосфері.

Ключові слова: вимивання речовин з атмосфери, вільні іони, ядра конденсації, ступінь перенасичення, коагуляція, інтенсивність опадів.

M.V. Kustov

The effect of the ion concentration in the atmosphere on the intensity of precipitation over the area of dangerous substances release

It is analytically examined the effect of the nuclei drop concentration and relative humidity on the rate of coagulation and evaporation of water in the process of precipitation in the atmosphere.

Keywords: leaching of substances from the atmosphere, free ions, condensation nuclei, the degree of supersaturation, coagulation, precipitation intensity.