

*М.В. Кустов, канд. техн. наук, ст. преподаватель, НУГЗУ*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМОВ КАПЛЕОБРАЗОВАНИЯ ПРИ ТУШЕНИИ ПОЖАРОВ АТМОСФЕРНЫМИ ОСАДКАМИ**

(представлено д-ром техн. наук Калугиным Д.В.)

Рассмотрены различные механизмы каплеобразования в атмосфере Земли. Установлена определяющая роль концентрации ионов и ионных кластеров в эффективности каплеобразования. Наиболее эффективным и перспективным методом интенсификации осадков для тушения пожаров на открытой местности определён метод конденсации пара на электрически заряженных аэрозольных частицах.

**Ключевые слова:** пожары на открытой местности, скорость каплеобразования, аэрозольные частицы, ионы, электростатическое взаимодействие, гидратация, аквакомплекс.

**Постановка проблемы.** Для тушения крупных пожаров на открытой местности, таких как лесные, степные и торфяные, необходимо затратить значительное количество огнетушащего вещества. Это вызвано обширной площадью пожара, большим энерговыделением в процессе горения, высокой скоростью распространения пожара и сложностью доставки огнетушащего вещества в зону горения. Практическим путём установлено, что для тушения 1 м<sup>2</sup> лесного пожара необходимо затратить, в зависимости от вида растительности, от 70 до 200 л воды, для тушения степного пожара той же площади – 50 л, а для ликвидации пожара на торфяниках – 160 л/м<sup>2</sup> [1, 2]. Также по данным Center of Fire Statistics (International Association of Fire and Rescue Services - CИIF) средняя площадь пожаров на открытой местности составляет 400 га, а в отдельных случаях достигает нескольких тысяч гектар. Обеспечить необходимую интенсивность подачи огнетушащего вещества для успешной ликвидации таких пожаров можно только задействовав большое количество сил и средств. Также получить достаточное количество огнетушащего вещества – воды - можно получить из атмосферы Земли, в 1 м<sup>3</sup> которой в среднем находится до 30 г воды [3]. В связи с этим одной из проблем, подлежащей разрешению, является установление факторов, повышающих эффективность каплеобразования в атмосфере Земли.

**Анализ последних достижений и публикаций.** На эффективность тушения пожаров на открытой местности значительное влияние оказывает большое количество метеорологических факторов (температура, ветер, влажность и др.). В работе [4] проведена оценка влияния метеорологических факторов на процессы развития и прекращения горения и установлено доминирующее влияние осадков в зоне пожара. Самопроизвольное выпадение осадков в зоне ликвида-

ции пожара случается в очень редких случаях и зависит от большого числа факторов. Поэтому для успешной ликвидации крупных пожаров на открытой местности необходимо искусственное влияние на процессы осадкообразования. На сегодняшний день известны методы понижения температуры за счёт распыления жидкого углекислого газа ( $\text{CO}_2$ ) и активизация осадков из облаков путём распыления солей йода [5-7]. Эти методы имеют ряд экономических и технических недостатков, основным из которых является ограничение их использования при влажности воздуха ниже 1,5 % [3].

**Постановка задачи и её решение.** Целью работы является установление факторов, влияющих на интенсивность получения огнегасящего вещества из атмосферных образований и возможности воздействия на них.

Механизмы осадкообразования существенно зависят от метеорологических условий в зоне зарождения [8]. В зависимости от температуры воздуха в облаке, формирование частиц осадков ( $r > 100$  мкм) происходит в основном двумя путями:

а) при  $t > 0^\circ\text{C}$ , когда облако состоит из жидких капелек воды, крупные капли — частицы осадков, образуются в результате конденсации (под конденсацией пара понимается как собственно конденсация пара на капле, так и конденсация на капле вследствие перегонки пара с мелких на крупные (переконденсация)) водяного пара и коагуляции капель;

б) при  $t < 0^\circ\text{C}$ , когда в облаке кроме капелек появляются частички твердой фазы, вступает в действие весьма эффективный механизм образования крупной частицы — перегонка пара с капель на кристалл, который получил название механизма Бергерона — Финдайзена. Натурные исследования облаков, дающих осадки, показали, что оба пути возможны в естественных условиях. Однако повторяемость теплых облаков ( $t > 0^\circ\text{C}$ ) значительно меньше, чем имеющих переохлажденную часть ( $t < 0^\circ\text{C}$ ), особенно в средних широтах.

Также установлено, что возможны и другие механизмы образования крупных капель, например: таяние градин, образование капель на гигантских солевых ядрах, разбрызгивание капель и т.д. Отметим, что теория осадкообразования достаточно хорошо разработана лишь для частиц сферической формы, выпадающих из конвективных облаков и облаков слоистых форм.

Как отмечено выше, при любых метеорологических параметрах необходимым условием образования воздушно-капельных дисперсий является наличие ядер конденсации, в качестве которых могут выступать ионы, ионные кластеры и частицы других веществ. В природе более 90% ядер конденсации составляют твердые частицы (пыли, продукты горения, частицы биологического происхождения). Вместе с тем, установлено, что наибольшая скорость каплеобразования на-

блюдается именно на ионах и ионных кластерах [7]. Это приводит к выводу, что электрическая составляющая процесса конденсации и коагуляции является доминирующей в процессе осадкообразования.

Для детального изучения процесса каплеобразования на электрически заряженных частицах, необходимо рассматривать каждый механизм отдельно.

В качестве простейшей заряженной частицы рассмотрим ион (катион или анион), следовательно, первичным механизмом является взаимодействие иона с молекулой воды. Этот процесс называется гидратацией, которая обусловлена электростатическим и ван-дер-ваальсовым взаимодействием. Образование катионных аквакомплексов объясняется донорно-акцепторным взаимодействием катиона с молекулами воды, а анионных - за счёт водородной связи [9]. Однако эти взаимодействия характерны только для первичной гидратации (рис. 1), вторичная гидратация, которая обуславливает дальнейший рост аквакомплекса, происходит за счёт водородных связей между молекулами воды.

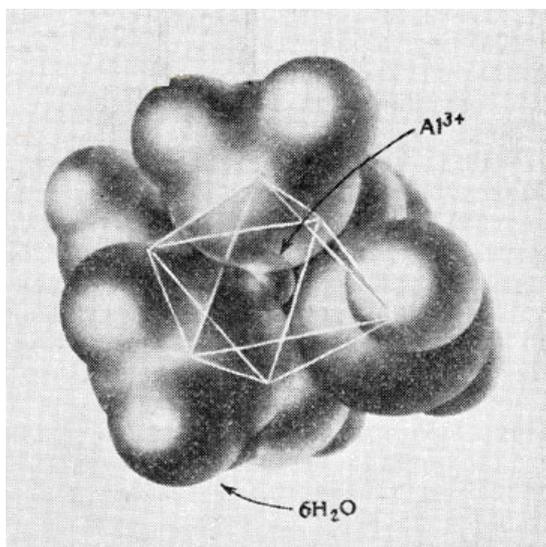


Рис. 1 – Структура первичной гидратации иона  $\text{Al}(\text{OH})_2^{3+}$

При анализе рассмотренного выше механизма, в процессе каплеобразования важным вопросом является определение размеров аквакомплекса или кластера. Согласно теории Дебая-Хюккеля основные характеристики, определяющие размеры надмолекулярного образования – кластера, это электрический потенциал и его распределение вокруг иона.

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

$$\nabla^2 \psi(r) = -4\pi\rho(r) / \varepsilon, \quad (1)$$

где  $\nabla^2$  – оператор Лапласа;  $\psi$  – потенциал;  $\rho$  – плотность заряда в точке  $r$ , для которой вычисляется потенциал;  $\varepsilon$  – диэлектрическая

проницаемость среды.

Плотность заряда  $\rho$  в уравнении (1) 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. Тогда плотность заряда  $\rho$  это не что иное, как плотность поляризационного заряда, образованного поляризацией молекул воды.

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

$$n_{пол} = \bar{n} \cdot \exp\left(-\frac{U}{kT}\right), \quad (2)$$

где  $\bar{n}$  – среднее число молекул воды в единице объема атмосферы;  $U$  – их энергия, соответствующая потенциалу  $\psi$ ,  $T$  – температура;  $k$  – постоянная Больцмана.

Энергия поляризованных молекул воды определяется выражением:

$$U = q_{H_2O} \cdot \psi, \quad (3)$$

где  $q_{H_2O}$  – поляризационный заряд молекулы.

Поляризационный заряд молекулы пропорционален заряду иона. Его значение также определяется количеством молекул воды, которые выстраиваются на линии, соединяющей ион и рассматриваемую молекулу, и экранируют поле иона [10].

Таким образом, размер аквакластера существенно зависит как от температуры среды, так и от заряда иона. В работе [11] теоретически показано, что при любых условиях размеры кластера не могут превышать 1,00 мкм. Экспериментальные данные [12] также свидетельствуют о том, что размер сольватных оболочек составляет несколько десятков диаметров молекулы воды. Из оценок присоединенной массы воды, структурированной вокруг каждого иона, следует, что радиус такого надмолекулярного образования составляет около 1 мкм. Из этого следует, что размеры единичного аквакластера недостаточны для выпадения из облаков, однако этот механизм может служить первичным звеном в процессе каплеобразования.

Следующим механизмом, который необходимо рассмотреть, является взаимодействие свободного иона и уже сформированной капли жидкости, а также взаимодействие иона с фрактальной структурой, в качестве которой могут выступать частицы льда и пыли. Этот механизм, в частном случае, может служить продолжением рас-

смотренного выше процесса связи иона с молекулой воды.

Взаимодействие ионов с твёрдой и жидкой поверхностями происходит двумя основными путями. Во-первых, при контакте капли или фрактальной частицы с высокоподвижными ионами, концентрация которых в атмосфере Земли достигает  $10^9 \text{ м}^{-3}$ , происходит поглощение кинетической энергии иона массивной частицей, в результате чего ионы оседают на её поверхности.

Так как в качестве частиц мы рассматриваем водосодержащие образования, то возможен и второй путь взаимодействия иона с частицей. В процессе испарения или конденсации воды её поверхность и прилегающий слой пара приобретают электрический заряд. Это происходит по причине того, что ионы  $\text{H}^+$  и  $\text{OH}^-$  имеют различную подвижность, в результате чего при испарении поверхность частицы приобретает положительный заряд, а при конденсации – отрицательный [13]. Таким образом, электростатически заряженная поверхность имеет электростатическое взаимодействие с окружающими ионами.

Если поверхность частицы имеет электрический заряд в результате либо присоединения единичного иона, либо скопления на поверхности радикалов  $\text{OH}^-$  при конденсации, то становится возможным взаимодействие частицы с молекулой воды. Таким образом, на дипольные молекулы воды, находящиеся в воздухе, воздействует неоднородное электрическое поле заряда, находящегося на поверхности аэрозольной частицы, с результирующей силой  $F$ , пропорциональной градиенту напряженности  $dE/dx$ , заряду диполя  $q_d$  и его размеру  $l$ :

$$F = q_d \cdot l \cdot dE / dx \quad (4)$$

Дипольные частицы движутся в сторону увеличения напряженности электрического поля, т.е. по градиенту модуля напряженности поля. В работе [14] проведено оценку сил взаимодействия молекул воды с заряженной аэрозольной частицей, и установлено существенное действие неоднородного электрического поля на удалении 1 мкм от поверхности аэрозольной частицы, что приводит к притяжению их к поверхности частицы.

И последним механизмом, подлежащим рассмотрению, является процесс взаимодействия между двумя электрически заряженными аэрозольными частицами в твёрдом или жидком состоянии.

Количественное описание этого взаимодействия имеет значительные сложности, вызванные в первую очередь разной методикой описания заряженных частиц сферической и фрактальной формы, поэтому этот вопрос является материалом дальнейших исследований. В настоящей работе остановимся на качественной оценке процесса.

При униполярной зарядке аэрозольных частиц на них действуют электростатические силы, отталкивающие друг от друга, что су-

щественно снижает скорость каплеобразования, следовательно биполярная зарядка аэрозолей должна приводить к повышению скорости каплеобразования. Однако при детальном рассмотрении локального объема аэрозоля можно отметить, что вследствие хаотического движения частиц вероятность нахождения на расстоянии действия электрических сил двух частиц, как одноименного, так и противоположного заряда, одинакова. Следовательно суммарный эффект повышения скорости слипания частиц разного заряда компенсирован низкой скоростью взаимодействия одноименно заряженных частиц и общая скорость каплеобразования биполярно заряженного аэрозоля будет несущественно отличаться от скорости коагуляции электронейтральных частиц. Экспериментальное подтверждение изложенного выше, для системы жидких капель, представлено в работе [15].

**Выводы.** В работе установлено доминирующее влияние на процесс осадкообразования наличия электрически заряженных частиц различной природы и рассмотрены механизмы каплеобразования на этих частицах. Первичной стадией зарождения осадков определено оседание биполярных молекул воды на ионах либо ионных кластерах. Дальнейшим этапом является оседание ионов на поверхности образованного аквакомплекса с последующим взаимодействием с молекулами воды. Установлено, что коагуляция заряженных капель не вносит существенного вклада в повышение скорости каплеобразования. Предполагается, что дополнительная ионизация воздуха повысит скорость осадкообразования в зоне тушения пожара и позволит обеспечить необходимое количество атмосферной жидкости в зоне тушения в нужное время.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Иванников В.П. Справочник руководителя тушения пожара / В.П. Иванников, П.П. Ключ // М.: Стройиздат, 1987. – 288 с.
2. Кимстач И.Ф. Пожарная тактика / И.Ф. Кимстач, П.П. Девлишев, Н.М. Евтюшкин // М.: Стройиздат, 1984. – 590 с.
3. Климатология / [Дроздов О.А., Васильев В.А., Кобышева Н.В. и др.]. - Л.: Гидрометеоздат, 1989. - 568 с.
4. Кустов М.В. Влияние климатических факторов на процессы развития и прекращения крупных пожаров на открытой местности / М.В. Кустов, В.Д. Калугин, В.В. Коврегин // Проблемы пожарной безопасности. – Харьков: НУГЗУ, 2011. – Вып. 29. – С. 102-110.
5. 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.
6. Израэль Ю.А. Метеорология и гидрология / Ю.А. Израэль, 2005. - № 10. - С. 5—9.
7. Ивлев Л.С. Химический состав и структура атмосферных аэ-

розолей / Л.С. Ивлев // Л., Изд. ЛГУ, 1982. - 366 с.

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

9. Измайлов Н.А. Электрохимия растворов / Н.А. Измайлов // М.: Химия, 1976. - 488с.

10. Рязанов М.И. Электродинамика конденсированного вещества / М.И. Рязанов // М.: Наука, 1984. – 304 с.

11. Бойко В.И. Оценка размеров сольватной оболочки катионных аквакомплексов в растворах солей / В.И. Бойко, М.А. Казарян, И.В. Шаманин, И.В. Ломов // Известия Томского политехнического института. – Томск, 2006. – Т. 309. - № 4. –С. 81–85.

12. Стишков Ю.К. Нарушение гомогенности слабопроводящих жидкостей в сильных электрических полях / Ю.К. Стишков, А.В. Стебляк // Журнал технической физики. – 1997. – Т. 67. - № 10. – С. 105-111.

13. Шавлов А.В. Механизм межфазной электризации при испарении и конденсационном росте льда и воды / А.В. Шавлов // Криосфера Земли. – 2008. - т. XII. - № 2 - С. 52-59.

14. 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>.

15. Грин Х. Аэрозоли – пыли, дымы и туманы / Х. Грин, В. Лейн // Л.: Химия, 1972. – 428 с.

nuczu.edu.ua

М.В. Кустов

**Дослідження механізмів каплеутворення при гасінні пожеж атмосферними опадами.**

Розглянуті різноманітні механізми каплеутворення в атмосфері Землі. Встановлена визначаюча роль іонів та іонних кластерів в ефективності каплеутворення. Найбільш ефективним та перспективним методом інтенсифікації опадів для гасіння пожеж на відкритій місцевості визначено метод конденсації пари на електрично заряджених аерозольних частинках.

**Ключові слова:** пожежі на відкритій місцевості, швидкість каплеутворення, аерозольні частинки, іони, електростатична взаємодія, гідратація, аквакомплекс.

M.V. Kustov

**Research of drops formation mechanisms at suppression of fires by the atmospheric precipitation.**

Various drops formation mechanisms in atmosphere of the Earth are considered. The defining role of concentration of ions and ionic clusters in efficiency of drops formation is established. The most effective and perspective of an intensification of deposits for suppression of fires on open district defines a method of condensation of steam on the electric aerosol particles.

**Keywords:** fires on open district, speed of drops formation, aerosol particles, ions, electrostatic interaction, hydration, aquacomplex.