

Запобігання та ліквідація надзвичайних ситуацій

УДК 614.841; 551.515

М.В. Кустов, В.Д. Калугин

Национальный университет гражданской защиты Украины, Харьков

К ВОПРОСУ О ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ РАЗЛИЧНЫХ МЕТОДОВ КОНДЕНСАЦИИ ДЛЯ ОСАЖДЕНИЯ АТМОСФЕРНОЙ ВЛАГИ

Проанализированы существующие технологические способы осаждения аквааэрозолей. Определены возможные механизмы осаждения атмосферной влаги. Предложена модификация метода искусственного осадкообразования с помощью электромагнитного излучения.

Ключевые слова: аквааэрозоль, осаждение, атмосфера Земли, аэродинамические свойства, методы воздействия на дисперсные частицы, электромагнитное излучение.

Введение

Постановка проблемы. Среди различных классов пожаров особые трудности при их ликвидации вызывают ландшафтные пожары. К ландшафтным пожарам относятся пожары природного характера, которые распространяются по большой площади – это низовые и верховые лесные пожары, степные пожары и пожары на торфяниках. Практическим путём установлено, что для тушения 1 м² 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/м² [1, 2]. Также по данным Center of Fire Statistics (International Association of Fire and Rescue Services - CTIF) средняя площадь пожаров на открытой местности составляет 400 га, а в отдельных случаях достигает нескольких тысяч гектар. Сложность ликвидации таких пожаров определяется большой площадью (несколько гектар) и скоростью (до 10 м/с) распространения, распространением пламени в глубине горючего материала (торфяные пожары), что приводит к необходимости использования большого количества огнетушащего вещества. Также условия развития пожара чаще всего затрудняет продвижение пожарной техники, что не позволяет обеспечить подачу необходимого количества огнетушащего вещества в зону тушения. Так как ландшафтные пожары происходят на открытой местности, то обеспечить подачу огнетушащего вещества необходимой интенсивности в зону ликвидации пожара можно путем использования атмосферной влаги. Однако процессы осадкообразования зависят от многих параметров и поэтому для использования осадков для тушения ландшафтных пожаров необходимо искусственное воздействие на процессы осаждения атмосферной влаги. В этой связи существенной проблемой, подлежащей разрешению, является обеспечение возможности образования осад-

ков необходимой интенсивности в зоне тушения путём активного воздействия на атмосферу Земли.

Анализ последних достижений и публикаций. В работах [3, 4] достаточно подробно изучены вопросы осаждения твёрдофазных и жидких аэрозолей, однако все предложенные методы пригодны лишь для малых объемов, подобных объемам технологических реакторов. Из этого следует, что возможность практического использования таких методов применительно к реальным атмосферным системам жидких аэрозолей чрезвычайно мала, однако принципы их функционирования могут быть использованы при разработке оборудования для реализации процесса искусственного осадкообразования.

Целью работы является анализ возможностей методов и механизмов их реализации для осаждения водосодержащих аэрозолей в атмосфере Земли, в рамках решения задачи тушения ландшафтных пожаров различного характера.

Основные результаты

Механизмы осаждения водосодержащих (твёрдых и жидких) аэрозолей можно разделить на следующие виды: инерционное осаждение (оседание частиц на жидких и твёрдых поверхностях), осаждение под действием внешних сил (гравитационное, электростатическое и др.) и диффузионное осаждение [3].

Интенсивность инерционного метода осаждения аэрозоля на поверхности-препятствии может быть представлена в виде сложной функции:

$$E = f(S, Re, K, R/\tau), \quad (1)$$

где S – площадь улавливающей поверхности, Re – число Рейнольдса; K – коэффициент взаимодействия частиц; R/τ – отношение радиуса частицы, на которую происходит оседание, к радиусу частицы аэрозоля.

Анализируя выражение (1) необходимо отметить, что параметры S и R/τ связаны между собой.

Так, при однаковому на поверхні кількості частиць, улавлюючих аерозоль, їх радіус обернено пропорційний площі поверхні взаємодії, виходячи з чого можна передбачити, що існує деякий оптимум співвідношення цих величин. Наше передбачення підтверджується результатами експерименту (табл. 1) [5].

Побудовані за даними табл. 1 залежності інтенсивності захопту рідинних частиць аерозолю (рис. 1) переконливо свідчать про наявність чіткого максимуму інтенсивності в області розміру рідинних крапель (500 – 700 мкм) для всіх розмірів частиць аерозолю. В цій же області розмірів спостерігається найбільша швидкість зростання крапель в атмосфері за механізмом коагуляції рідинних частиць аерозолю, яка поступово зменшується в уже сформованих хмарах.

Таблиця 1

Показатель інтенсивності захопту рідинних частиць аерозолю радіусом r рідинними краплями радіусом R

Радіус краплі R , мкм	Радіус частинки аерозолю r , мкм				
	1	2	4	6	10
100	0,01	0,03	0,18	0,47	0,83
600	0,01	0,17	0,54	0,74	0,91
1000	0,01	0,15	0,52	0,74	0,90
3000	0	0,02	0,33	0,55	0,81

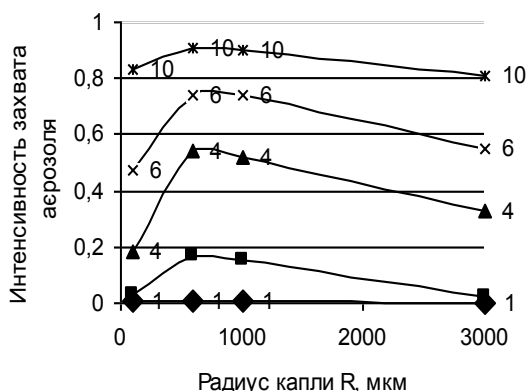


Рис. 1. Вплив розміру (R) аерозольних частиць в атмосфері на показник інтенсивності захопту аерозолю

Найбільші труднощі викликає аналіз коефіцієнта взаємодії частиць, так як він залежить від фізико-хімічних особливостей поверхонь двох частиць і враховує агрегатне стан частинки аерозолю, її гігроскопічність, форму поверхні і т.д.

В разі водосодержащих аерозолей необхідно відзначити, що коагуляція малих крапель з великими може відбуватися безпосередньо перед самопроизвольними опадками в шароподібних і високослоистих хмарах [6]. Інтенсивність процесу інерційного осадження малих крапель або частиць льоду на рідинних краплях в хмарах велика внаслідок великої площі поверхні

адсорбції. Однак термін життя хмар з такими великими рідинними частинками достатньо малий і в залежності від кліматичної ситуації становить $1 \div 24$ години, після чого відбувається опадання зведеної рідинної фази на поверхню Землі в формі різних (за агрегатним станом) опадків. При цьому не можна не враховувати, що наявність вказаних типів хмар в зоні гасіння ландшафтних пожег носить епізодичний характер і залежить від великої кількості факторів.

Викладене вище вказує на те, що інерційний механізм осадження водосодержащего аерозолю не можна розглядати як високо-ефективний спосіб штучного осадкоутворення в зоні гасіння. Хоча, за всіма ознаками, інерційний механізм може виявитися позитивним супутнім фактором збільшення інтенсивності утворення опадків в присутності інших, більш ефективних методів осадження.

Метод фільтрації — відокремлення твердих і рідинних зважених частиць від повітря пропускаючи його через пористу фільтрувальну перегородку, яка затримує частинки на своїй поверхні або в порах [3]. Цей метод дуже ефективний і часто використовується в різних технологічних процесах, однак масштаби (об'єми) атмосферних аерозольних утворень неспівнячно більші об'ємів промислових апаратів, і тому реалізувати метод фільтрації неможливо для досягнення поставленої мети.

Використання для процесу штучного осадкоутворення ефектів термофореза (теплове осадження частиць), фотофореза (рух під впливом інтенсивного освітлення), дифузіофореза (рух під впливом градієнта концентрації пари) малоймовірно, так як вони в основному використовуються в лабораторних умовах і мало-ефективні в умовах технологічних процесів.

Особливий інтерес при розв'язанні проблеми штучного осадкоутворення викликає метод осадження частиць в електричному полі — електропрещипітання [4]. Частиці більшості аерозолей, зустрічаються в технологічних процесах, заряджені і тому здатні рухатися в бік електродів з протилежним зарядом. Для більшої ефективності процесу осадкоутворення (збільшення швидкості осадження), частинки аерозолю штучно заряджають, використовуючи головним чином коронний розряд — сильно іонізовану газову середу. Повністю природно, що в масштабах земної атмосфери технічно реалізувати процес осадження заряджених частиць на електродах достатньо складно, однак таким механізмом можна ефективно прискорити агрегацію і коагуляцію малих частиць в великі, з наступним їх осадженням на поверхню Землі. При розгляді механізму електропрещипітання необхідно також враховувати вплив рівня активності сонячної радіації на концентрацію заряджених частиць в атмосфері.

Перспективним является метод засеваания (распыления) зоны воздействия на процесс осадкообразования электрически заряженными твёрдыми либо жидкими частицами [3, 4]. Этот метод существенно ускоряет процесс электропреципитации и имеет ряд преимуществ по сравнению с коронным разрядом. Во-первых, крупные заряженные частицы распространяются на гораздо большее расстояние от источника, чем ионизированная газовая среда, а, во-вторых, данный метод более прост в плане технической реализации. Уменьшение количества атмосферных аэрозольных частиц при электроосаждении описывается уравнением [3]:

$$-\frac{dn}{dt} = K \cdot n^2 \cdot \left(\frac{\lambda}{\exp \lambda - 1} \right), \quad (2)$$

где $\lambda = \frac{q_1 \cdot q_2}{2r \cdot k \cdot T}$; K – константа коагуляции аэрозольных частиц; n – число частиц в элементарном объеме; q_1 и q_2 – электрические заряды частиц, которые взаимодействуют между собой, Кл; r – радиус дисперсных частиц, м; k – постоянная Больцмана; T – температура газовой среды аэрозоля, К.

Из уравнения (2) следует, что скорость осаждения зависит не только от величины заряда частиц, но и от знака заряда. Аэрозоли, в которых частицы имеют одинаковый заряд, оседают гораздо медленнее, чем в случае разноименно заряженных частиц аэрозоля. Соответственно, для решения поставленной в работе проблемы необходимо рассматривать аэрозоли с разноименно заряженными частицами твёрдой или жидкой фазы. Однако представленное выше уравнение описывает взаимодействие только между двумя частицами в элементарном объеме, поэтому при рассмотрении всего объема аэрозоля, в котором частицы с разным знаком заряда распределены равномерно, необходимо учитывать, что вероятность взаимодействия одноименно и разноименно заряженных частиц практически одинакова. Исходя из этого, положительный эффект осаждения заряженных частиц существенно снижается за счёт низкой скорости коагуляции частиц с одинаковым зарядом.

Для осаждения аэрозолей в больших масштабах Элтон [7] предложил метод, предполагающий распыление поверхностно-активных веществ, которые при попадании на частицы аэрозоля способствуют их агрегации с последующим оседанием. Этот метод прошёл практические испытания при осаждении тумана и показал низкую эффективность. Поэтому в дальнейшем исследовательские работы по исследованию этого метода практически не проводились. Однако по нашим представлениям более детальное изучение механизмов, на которых основан метод засеваания зоны распространения аэрозоля поверхностно-активными веществами, позволит повысить его эффективность не только для осаждения аэрозолей как с жидкой, так и с твёрдой дисперсной фазой.

Одним из методов осаждения водосодержащих аэрозолей является звуковой метод [4]. Он основывается

на эффекте активизации процесса агрегации мелких частиц под действием внешнего облучения аэрозоля звуковыми волнами. Однако этот метод низкоэффективен вследствие малой энергии звуковой волны, а также имеет трудности в технической реализации для осаждения аэрозоля в больших объемах ввиду малой дальности распространения звука в атмосфере.

Эффект агрегации частиц аэрозоля наиболее проявляется при электромагнитном облучении. Преимущество электромагнитных волн перед звуковыми заключается в способности первых к распространению на большие расстояния с малыми потерями мощности, что позволяет облучать аэрозоли значительных объёмов. Основными параметрами аэрозолей, которые определяют эффективность взаимодействия частиц дисперсной фазы с электромагнитным излучением, являются: альbedo единичного рассеивания, коэффициент ослабления электромагнитного излучения, индикатриса рассеяния, химический и концентрационный состав аэрозоля и влажность атмосферы [8]. Для полного анализа влияния электромагнитного излучения на процесс агрегации частиц аэрозоля необходимо проведение дополнительных исследований по установлению количественного влияния каждого из параметров.

В связи с выше сказанным, рассмотрим взаимодействие электромагнитного излучения с веществом дисперсной частицы аэрозоля, которое порождает в её объёме распределение источников энергии электромагнитной природы. Это приводит к определённому распределению температуры по объёму частицы и характеризуется так называемой функцией источников $B(r, \theta, \varphi)$, где r – радиус частицы аэрозоля, θ – угол облучения, φ – угол распространения излучения в сферической частице. Для неполяризованного монохроматического излучения она может быть записана в виде:

$$B(\theta, \varphi) \approx \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \frac{E(r, \theta, \varphi)^2}{E_0^2} d\varphi = B\left(r, \theta, \frac{\pi}{4}\right), \quad (3)$$

где $E(r, \theta, \varphi)$ – локальная напряжённость электрического поля внутри частицы; E_0 – амплитуда напряжённости поля в волне [9].

В зависимости от значения так называемого дифракционного параметра $\rho = 2\pi R_0/\lambda$ (R_0 – радиус частицы аэрозоля, λ – длина волны) и показателя преломления $m(\lambda)$, распределение электромагнитной энергии внутри частицы может иметь весьма сложный и неоднородный характер.

В принципе функция источников $B(r, \theta, \varphi)$ для сферической частицы может быть рассчитана на основе классической электродинамической теории Лоренца-Ми [10], что позволяет определить количество и интенсивность поглощённого частицей излучения, которое преобразуется в энергию теплового движения молекул аэрозольной частицы. Внутри неё устанавливается определённое температурное поле, которое возможно определить путём решения тепловой задачи

(решение неоднородного нестационарного уравнения теплопроводности для частицы с соответствующими краевыми условиями, учитывающими характер теплообмена частицы с окружающей средой). В результате решения этой задачи определяется распределение температурного поля по объему частицы.

Хорошо известно [11], что на неоднородно нагретые частицы в газе действует радиометрическая сила F :

$$F = -\frac{R \cdot P \cdot L^2}{T} G, \quad (4)$$

где R – радиус частицы, м; P – давление, Па; L – длина свободного пробега молекул газа, м; T – абсолютная температура аэрозоля, К; G – градиент температуры, К/м.

Другие авторы [9] используют вместо параметров давления (P) и длины пробега молекул (L), коэффициент кинематической вязкости (ν). Это принципиально не меняет вида описания радиометрической силы, а лишь подтверждает, что основным механизмом осаждения аэрозоля в температурном поле является взаимодействие молекул газовой среды с поверхностью частиц аэрозоля. В результате воздействия электромагнитного излучения на аэрозоли происходит их направленное движение под действием силы F .

В зависимости от физико-химических свойств частиц аэрозоля электромагнитное излучение может принципиально по-разному влиять на изменение их температуры (нагрев облучаемой стороны либо противоположной). Поэтому, при электромагнитном облучении аэрозоля сила F может вызывать движение частиц либо по направлению распространения излучения, либо в противоположном направлении, что способствует усилению процесса коагуляции частиц водосодержащего атмосферного аэрозоля.

Облучение аэрозоля электромагнитными волнами определенной частоты и большой мощности приводит к изменению электрических свойств частиц аэрозоля. При униполярной зарядке аэрозольных частиц на них действуют электростатические силы, отталкивающие друг от друга, что существенно 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 [12].

Представленные выше возможности электромагнитного воздействия на аэрозоли свидетельствуют о перспективности его использования для решения проблемы искусственного осадкообразования из атмосферы Земли для успешного тушения ландшафтных пожаров. Однако для повышения эффективности этого процесса и решения наиболее сложной задачи – его технической реализации, необходимо дальнейшее изучение влияния электромагнитного излучения на процессы агрегации аэрозолей.

Выводы

На основе проведенного анализа существующих и разрабатываемых методов осаждения аэрозолей установлено, что наиболее перспективным методом искусственного осаждения водосодержащих аэрозолей в атмосфере Земли является метод агрегации мелких частиц под действием электромагнитного излучения. В качестве вспомогательных методов, дополнительно повышающих эффективность процесса электромагнитной агрегации, предлагается использовать методы засева зоны распространения аэрозоля заряженными частицами и (или) поверхностно-активными веществами.

Список литературы

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. Фукс Н.А. Успехи механики аэрозолей / Фукс Н.А. – М.: Изд. АН СССР, 1961. – 351 с.
4. Качурин Л. Г. Физические основы воздействия на атмосферные процессы / Л. Г. Качурин. – Л.: Гидрометеоиздат, 1990. – 463 с.
5. Mason B.J. Clouds, Rain and Rainmaking. Cambridge, 1962. – 140 p.
6. Климатология / [Дроздов О.А., Васильев В.А., Кобышева Н.В. и др.]. - Л.: Гидрометеоиздат, 1989. – 568 с.
7. Elton G.A.H., Chem. and Ind. / Elton G.A.H., №10, 1953. – 219 p.
8. Зуев В.Е. Оптика атмосферного аэрозоля / В.Е. Зуев, М.В. Кабанов. – Л.: Гидрометеоиздат, 1987. – 254 с.
9. Береснев С.А. Асимметрия поглощения электромагнитного излучения и фотофорез аэрозольных частиц / С.А. Береснев, А.В. Старинов, П.Е. Суетин. // Научные труды Института теплофизики УРО РАН, 1999. – № 3. – С. 185- 197.
10. Борен К., Хафмен Д., Поглощение и рассеяние света малыми частицами / К. Борен, Д. Хафмен. – М.: Мир, 1986. – 664 с.
11. Ивлев Л.С. Физика атмосферных аэрозольных систем / Л.С. Ивлев, Ю.А. Довгалюк. – СПб.: НИИХ СПбГУ, 1999. – 194 с.
12. Грин Х. Аэрозоли – пыли, дымы и туманы / Х. Грин, В. Лейн. – Л.: Химия, 1972. – 428 с.

Поступила в редколлегию 7.03.2012

Рецензент: д-р техн. наук, проф. С.И. Азаров, Институт ядерных исследований НАН Украины, Киев..

**ДО ПИТАННЯ О МОЖЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ РІЗНИХ МЕТОДІВ КОНДЕНСАЦІЇ
ДЛЯ ОСАДЖЕННЯ АТМОСФЕРНОЇ ВОЛОГИ**

М.В. Кустов, В.Д. Калугін

Проаналізовані існуючі технологічні способи осадження аквааерозолів. Визначені можливі механізми осадження атмосферної вологи. Запропонована модифікація методу штучного опадоутворення, який полягає у використанні електромагнітного випромінювання.

Ключові слова: аквааерозоль, осадження, атмосфера Землі, аеродинамічні властивості, методи впливу на дисперсні частки, електромагнітне випромінювання.

**TO THE QUESTION ON POSSIBILITY OF APPLICATION OF VARIOUS METHODS
OF CONDENSATION FOR SEDIMENTATION OF THE ATMOSPHERIC MOISTURE**

M.V. Kustov, V.D. Kalugin

Existing technological ways of sedimentation of aerosols are analysed. Possible mechanisms of sedimentation of an atmospheric moisture are defined. The method of artificial formation of deposits by means of electromagnetic radiation is offered.

Keywords: an aerosol, sedimentation, atmosphere of the Earth, aerodynamic properties, influence kinds on disperse particles, electromagnetic radiation.