

УДК 614.841; 551.515

М.В. Кустов, В.Д. Калугин

Национальный университет гражданской защиты Украины, Харьков

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВОДОСОДЕРЖАЩИХ ОБРАЗОВАНИЙ В АТМОСФЕРЕ ДЛЯ ТУШЕНИЯ КРУПНЫХ ПОЖАРОВ НА ОТКРЫТОЙ МЕСТНОСТИ

В целях развития представлений об искусственном влиянии на процесс осадкообразования в атмосфере рассмотрены физико-химические основы зарождения (в заданных координатах поверхности Земли) и развития процессов конденсирования частиц. Проанализированы математические подходы для описания влияния физических параметров атмосферы на концентрацию конденсированных частиц. Показано, что при конкретизации задачи существуют пути существенного упрощения решения модели процесса облакообразования.

Ключевые слова: пожары на открытой местности, факторы осадкообразования, ветер, влажность, ядра конденсации, осадки.

Введение

Постановка проблемы. Ситуация с крупными пожарами на открытой местности, такими как лесные пожары, пожары на торфяниках, горение крупных разливов нефти и нефтепродуктов, убедительно демонстрирует недостаточную эффективность используемых способов и методов борьбы с такими чрезвычайными ситуациями. Необходимо учесть, что на процесс развития указанных выше типов пожаров существенную роль играет климатическая ситуация в зоне чрезвычайной ситуации. Существенно повышает эффективность борьбы с такими чрезвычайными ситуациями наличие осадков. В этой связи одной из проблем, подлежащей разрешению, является исследование процесса осадкообразования.

Анализ последних достижений и публикаций. Основными климатическими факторами, которые влияют на процессы развития и прекращение

горения пожаров на открытой местности являются: скорость ветра, влажность и температура воздуха, наличие или отсутствие осадков, и др. [1, 2]. Возможности человека на управление этими факторами весьма ограничено вследствие того, что все климатические явления являются сверх энергетичными. Однако известны и широко применяются метод понижения температуры за счёт распыления жидкого углекислого газа (CO₂) и активизация осадков из облаков путём распыления солей йода [3 - 5]. Однако, данные методы имеют ряд ограничений по своему применению, поэтому для повышения эффективности методов искусственного осадкообразования необходимо рассмотрения физико-химических процессов, протекающих при образовании осадков.

Целью работы является исследование возможности гарантированного управления процессами конденсации воды в атмосфере для обеспечения условий эффективной ликвидации чрезвычайных ситуаций.

Основные результаты

Существенное влияние на процесс ликвидации пожаров большой площади на открытой местности оказывает наличие осадков. 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.

Для разработки методов и способов влияния на интенсивность осадков в необходимом регионе особое значение имеет детальное рассмотрение физико-химических аспектов процесса осадкообразования.

Осадками называются капли воды и кристаллы льда, выпадающие на поверхность Земли. Осадки различаются по агрегатному состоянию (жидкие – дождь, морось, туман, твердые – град, снег, крупа), форме частиц (град – снег) и интенсивности выпадения. В природе довольно часто встречаются также осадки со смешанными характеристиками.

Зарождение частиц осадков в атмосфере из пара всегда происходит на аэрозольных частицах. Существуют три типа частиц, на которых образуется жидкая фаза и которые называются ядрами конденсации:

- 1) гигроскопические частицы, растворяющиеся в воде;
- 2) смачиваемые, но не растворяющиеся частицы;
- 3) не вполне смачиваемые частицы [9].

Образование капель на гигроскопических ядрах хорошо изучено экспериментально и теоретически. Рост капли раствора гигроскопического вещества благодаря эффекту Рауля может идти при довольно низких значениях относительной влажности (f), меньших влажности насыщения над чистой водой. При адсорбции водяного пара на поверхности смачиваемых частиц образуется тонкая пленка воды, и частицы становятся зародышевой каплей. Частицы с дефектами поверхности покрываются пленкой воды на вогнутых участках, в которых конденсируется влага при относительных влажностях, меньших 100 %.

К гигроскопическим ядрам, в первую очередь, следует отнести солевые частицы континентального и местного происхождения. К нерастворимым смачиваемым ядрам относятся частицы почвы и горных пород, дыма, органических веществ, микроорганизмы. Эти ядра в основном континентального проис-

хождения. Массовая концентрация их значительно больше, чем гигроскопических ядер. Содержание ядер третьего типа в атмосфере также велико. В частности, к плохо (не вполне) смачиваемым относятся частицы сажи и кремнезема. В реальной атмосфере аэрозольные частицы весьма часто не могут быть четко отнесены ни к одному из указанных типов. Это так называемые смешанные ядра, представляющие собой конгломерат мелких ядер различных типов. Такие частицы по своей способности расти и образовывать водяные капли похожи на гигроскопические ядра [10].

Концентрация ядер конденсации, т.е. количество ядер в единице объема, – величина, меняющаяся даже в приземном слое атмосферы в широких пределах. В среднем можно считать, что на континентах концентрация ядер у земной поверхности составляет 10^4 частиц/см³, а в городах доходит до 10^5 частиц/см³. С высотой концентрация ядер убывает приблизительно в 10 раз на каждые 2 км. Концентрация ядер в облаке оказывается существенно меньше, чем под облаком и выше его. Очевидно, что этот факт обусловлен захватом каплями и кристаллами облака ядер конденсации. Анализ проб, взятых в ледяных облаках, показывает, что в кристаллах льда почти всегда имеется большое количество захваченных ядер [10]. Основным механизмом образования кристаллов льда из переохлажденных капель, по-видимому, является замерзание. Некоторые из аэрозольных частиц могут служить центрами кристаллизации переохлажденной воды, т.е. так называемыми ядрами (центрами) кристаллизации. Замерзанию капель способствует адсорбция ими ядер кристаллизации. Эту роль могут играть как нерастворимые, так и растворимые частицы, если выкристаллизовывание растворенного вещества происходит раньше, чем спонтанное замерзание капель. На сегодняшний день существует две гипотезы о механизме действия ядер кристаллизации:

а) эпитаксия ко льду, т.е. направленный рост кристаллической решетки при отложении на ядре молекул водяного пара;

б) ядро кристаллизации вызывает перестройку поверхностного слоя воды, например, под действием электрических сил, что приводит к понижению поверхностного натяжения и облегчает тем самым перестройку в кристалл [11].

Облачные капли обычно существуют в жидком состоянии при температуре значительно ниже 0°C. Облака, состоящие из водяных капель, как правило, наблюдаются до температуры -10°C, а иногда и до -35°C. Такое состояние переохлаждения метастабильно. Оно обусловлено отсутствием ядер кристаллизации.

Дальнейший рост капель до размеров, достаточных для их выпадения на Землю ($r > 100$ мкм), происходит в основном двумя путями:

а) при $t > 0$ °С, 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 $t < 0$ °С, когда в облаке кроме капелек появляются частички твердой фазы, вступает в действие весьма эффективный механизм образования крупной частицы — перегонка пара с капель на кристалл (механизм Бергерона-Финдайзена) [10].

Исходя из вышеизложенного, основным фактором, определяющим интенсивность осадкообразования, является концентрация ядер конденсации определённой химической природы. Именно поэтому основным методом искусственного воздействия на процессы выпадения осадков, который активно используется на сегодняшний день, является засев облаков микрочастицами соли йода. Такая обработка кучевых облаков в зоне крупного пожара позволяет существенно повысить эффективность его тушения. Однако на основе данных о практическом пожаротушении установлено, что подавляющее большинство пожаров на открытой местности возникает в жаркую безоблачную погоду. В таких условиях засев атмосферы твёрдыми гигроскопическими частицами не даёт желаемого результата и поэтому возникает настоятельная необходимость в разработке новых и усовершенствовании старых методов воздействия на процесс осадкообразования, которые бы позволили обеспечивать формирования и доставку осадков в зоне развития пожара при низкой концентрации водяного пара в атмосфере.

Для обеспечения эффективной ликвидации пожаров на открытой местности при любых погодных условиях с помощью методов интенсификации процессов искусственного осадкообразования необходимо дополнительное изучение этого процесса. Кроме рассмотренных выше характеристик облачной среды, влияющих на процесс осадкообразования, таковыми являются: давление (p), плотность (ρ), температура (T), поле скоростей (\mathbf{v}), удельная влажность (q), концентрация капель радиусом r ($n(r)$) и концентрацией ($n_i(l)$) ледяных частиц размером l i -й конфигурации. В общем случае они могут быть получены на основе совместного решения уравнений гидротермодинамики и кинетики для функции распределения облачных частиц по размерам. В предположении изотропности и однородности поля турбулентности системы таких уравнений уравнение движения имеет следующий вид:

$$\rho \frac{d\mathbf{v}}{dt} = -\text{grad}p + \rho \cdot k_v \cdot \Delta \mathbf{v} + \rho \cdot \vec{f}_g, \quad (1)$$

где k_v – коэффициент турбулентной вязкости;

Δ – оператор Лапласа;

\vec{f}_g – результирующая силы поля тяжести и отклоняющего влияния вращения Земли (силы Кориолиса);

уравнение неразрывности:

$$\frac{d\rho}{dt} = \rho \cdot \text{div} \vec{v}, \quad (2)$$

где $\text{div} \vec{v} = \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z}$;

уравнение состояния:

$$p = \rho \cdot \frac{R}{\mu} \cdot T, \quad (3)$$

где R – универсальная газовая постоянная, $R=8,314$ Дж/(моль·К);

μ – молярная масса, кг/моль;

уравнение притока теплоты (уравнения сохранения энергии):

$$\rho \cdot \vec{n}_p \cdot \frac{dT}{dt} = \rho \cdot \vec{n}_p \cdot k_T \cdot \Delta T + \Phi + Q_R, \quad (4)$$

где k_T – коэффициент турбулентной теплопроводности;

Δ – оператор Лапласа; $\Phi=L_c m_w + L_s m_i + L_f m_{wi}$;

L_c, L_s, L_f – теплоты конденсации, сублимации и замерзания соответственно;

m_w, m_i, m_{wi} – массы соответственно конденсированной, сублимированной и замерзшей воды за единицу времени в единице объема;

Q_R – радиационная составляющая притока теплоты (учет ее важен только на границах облака, в слоях толщиной около 100 м);

уравнение для парообразной влаги:

$$\rho \frac{dq}{dt} = \rho \cdot k_q \cdot \Delta q - m_{\dot{a}} - m_{\dot{e}}. \quad (5)$$

Представленные уравнения являются основой для математического описания влияния перечисленных выше физических и физико-химических свойств атмосферы на концентрацию осадочных частиц.

Однако решение системы уравнений (1) – (5) вызывает значительные математические трудности. Для упрощения решения уравнений предлагается конкретизировать задачу под отдельный вид атмосферных образований. Основными классами, имеющими свои физико-химические особенности, являются: отсутствие облачных образований, слоистые облака и конвективные облака.

При анализе математической модели для участка атмосферы без облачных образований возникает возможность не учитывать в уравнении параметры, описывающие лёдообразование и сублимацию, так как ледяные частицы в данном случае практиче-

ски отсутствуют. Также, по причине сверхмалых размеров аэрозольных частиц, можно с достаточной степенью точности пренебречь влиянием сил тяжести и силы Кориолиса.

При рассмотрении слоистых облаков, ввиду их значительной горизонтальной протяженности относительно вертикальных размеров, незначительный вклад в процесс облакообразования оказывают горизонтальная турбулентность и горизонтальное распределение скорости потока, которые существенны в случае конвективных облаков.

Конвективные облака имеют наиболее сложное описание, так как в их объеме присутствует вода во всех трех агрегатных состояниях и физические параметры существенно изменяются как по вертикали, так и по горизонтали. Однако при рассмотрении структуры конвективного облака [12] необходимо сделать вывод, что его можно разбить на отдельные структурные составляющие, в которых протекают подобные физические процессы. Такими составляющими являются приграничная зона облака и его центральная часть.

Выводы

В целях развития представлений об искусственном влиянии на процесс осадкообразования в атмосфере рассмотрены физико-химические основы зарождения (в заданных координатах поверхности Земли) и развития процессов конденсирования частиц. Проанализированы математические подходы для описания влияния физических параметров в атмосфере Земли на концентрацию конденсированных частиц в рамках решения проблемы искусственного осадкообразования. Показано, что при конкретизации задачи существуют пути существенного упрощения решения модели процесса облакообразования.

АНАЛІЗ ВПЛИВУ КЛІМАТИЧНИХ ФАКТОРІВ НА ПРОЦЕСИ РОЗВИТКУ ТА ПРИПИНЕННЯ ВЕЛИКИХ ПОЖЕЖ НА ВІДКРИТІЙ МІСЦЕВОСТІ

М.В. Кустов, В.Д. Калугин

З метою розвитку уявлень про штучний вплив на процес утворення опадів в атмосфері розглянуто фізико-хімічні основи зародження та розвитку процесів конденсації часток. Проаналізовано математичні підходи для опису впливу фізичних параметрів атмосфери на концентрацію конденсованих часток. Показано, що при конкретизації задачі існують шляхи суттєвого спрощення вирішення моделі процесу утворення опадів.

Ключові слова: пожежі на відкритій місцевості, фактори утворення опадів, вітер, вологість, ядра конденсації, опади.

USE OF WATER CONTAINING FORMATIONS IN ATMOSPHERE FOR SUPPRESSION OF THE BURNOUT ON OPEN DISTRICT

M.V. Kystov, V.D. Kalugin

With a view of representations development about artificial influence on process deposit formation in atmosphere physical and chemical bases of origin (in the set coordinates of a surface of the Earth) and developments of processes condensation particles are considered. Mathematical approaches for the description of influence of atmosphere physical parameters on concentration of the condensed particles are analysed. It is shown that at a problem concrete definition there are ways of essential simplification of the decision of model of process formation of deposits.

Keywords: fires on open district, factors formation of deposits, a wind, humidity, condensation kernels, deposits.

Список литературы

1. Кимстач И.Ф. Пожарная тактика: Учеб. пособие для пожарнотехн. училищ и нач. состава пожарной охраны / И.Ф. Кимстач, П.П. Девлишев, Н.М. Евтюшкин. – М.: Стройиздат, 1984. – 590 с.
2. Пожежна тактика: підручн. / [Клюс П.П., Палюх В.Г., Пустовой А.С. та ін.]. – Х.: Основа, 1998. – 592 с.
3. 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.
4. Израэль Ю.А. Метеорология и гидрология / Ю.А. Израэль // Метеорология. – 2005. – № 10. – С. 5-9.
5. Ивлев Л.С. Химический состав и структура атмосферных аэрозолей / Л.С. Ивлев // Л., Изд. ЛГУ, 1982. – 366 с.
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. – 224 с.
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. Климатология / [Дроздов О.А., Васильев В.А., Кобышева Н.В. и др.] – Л.: Гидрометеиздат, 1989. – 568 с.
10. Ивлев Л.С. Физика атмосферных аэрозольных систем / Л.С. Ивлев, Ю.А. Довгалюк. – СПб.: НИИХ СПбГУ, 1999. – 194 с.
11. Мейсон Б. Дж. Физика облаков / Б. Дж. Мейсон. – Л.: Гидрометеиздат, 1961. – 541 с.
12. Довгалюк Ю.А. Некоторые особенности динамики развития конвективных облаков / Ю.А. Довгалюк // Метеорология и гидрология. – 1968. – В. 6. – С. 39-47.

Поступила в редколлегию 8.04.2011

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Х.В. Раковский, Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков.