

01;03;12

О физическом механизме подавления плотного дыма в замкнутых помещениях введением заряженного водного аэрозоля

© В.В. Салов, С.О. Ширяева, В.А. Салов, А.С. Голованов

Ярославский государственный университет им. П.Г. Демидова

E-mail: shir@uniyar.ac.ru

В окончательной редакции 21 марта 2001 г.

Экспериментально показано, что быстрое рассеивание оптически плотного аэрозоля при введении сильно заряженного жидкокапельного аэрозоля связано с ускорением объемной коагуляции и электростатическим расталкиванием образовавшихся заряженных агломератов.

1. Эффект рассеяния оптически плотного аэрозоля (пыли, дыма или тумана) за характерное время ~ 100 s при введении в него униполярно заряженного жидкокапельного аэрозоля известен уже более полувека [1]. Но отсутствие адекватного теоретического истолкования явления препятствует его эффективному практическому использованию, хотя накопление экспериментальных данных идет непрерывно [2–5]. На первой стадии теоретического осмысливания феномена [1] определяющая роль в истолковании обсуждаемого явления отводилась (без проведения каких-либо оценок) электрической коагуляции аэрозоля. Однако такое объяснение не согласуется с реально регистрируемыми малыми характерными временами рассеяния аэрозоля. Электростатическая коагуляция пыли, дыма или капель тумана на крупных (~ 30 μ m) заряженных каплях воды, происходящая за счет быстро убывающих с расстоянием электрических индукционных сил, может привести к заметному уменьшению счетной концентрации аэрозоля на временных интервалах, на два-три порядка больших, чем реально наблюдаемые [2–5]. В [6–7] были развиты теоретические представления о физических закономерностях подавления оптически плотного аэрозоля, основанные на представлениях о рэлеевском распаде сильно заряженных капель, вводимых в оптически плотный аэрозоль, сопровождающемся эмиссией сотен высокодисперсных сильно заряженных капелек [8], обладающих

высокой подвижностью и скоростью коагуляции с частицами дыма или пыли, с последующим электростатическим отталкиванием образующихся агломератов. Идея, предложенная в [6–7], дает хорошее согласие с экспериментальными данными при расчетах на модельном идеализированном оптически плотном аэрозоле. Однако остается неясным, за счет какого физического механизма происходит улучшение оптических характеристик аэрозоля. Теоретически возможны четыре варианта: 1) коагуляция сильно заряженных капелек воды с несколькими частицами исходного аэрозоля, сопровождающаяся электростатическим расталкиванием частиц с увеличением расстояния между ними; 2) коагуляция капелек воды с частицами аэрозоля в крупные агломераты, оседающие под действием силы тяжести; 3) коагуляция капелек воды с частицами аэрозоля в крупные агломераты с последующим электростатическим расталкиванием частиц с увеличением расстояния между ними; 4) комбинация второго и третьего механизмов. Выяснить, как на самом деле происходит рассеяние оптически плотного аэрозоля, можно только в прямом эксперименте. Этой проблеме и посвящено настоящее сообщение.

2. Эксперименты проводились в аэрозольной камере объемом 24 m^3 . Задымление осуществлялось в беспламенном режиме с помощью дымогенератора, работавшего при температуре $\approx 670 \text{ K}$. О степени задымленности судили по оптической прозрачности среды по показателям трансмиссометра. В качестве источника света использовался лазер ЛГН-105, ориентированный вдоль одной из диагоналей камеры. Фотоприемником служил фотодиод типа ФД-27К. Величина фототока $I(t)$ регистрировалась самописцем типа ПДП 4-002, в относительных единицах. Параллельно измерялась счетная концентрация дымовых частиц с помощью ультрамикроскопа ВДК-4. Определялась массовая концентрация дымовых частиц путем улавливания их на абсолютный фильтр АФА-ДП-3. С помощью электрометра ВК-2-16 измерялся объемный заряд дисперсной фазы.

Задымление прекращалось по достижении заранее установленной величины фототока. Задымленная среда выдерживалась в течение 10 мин для достижения однородности. Начальные параметры задымленной среды были следующими: $T = 298 \text{ K}$, относительная влажность $E = 70\%$, счетная концентрация частиц дыма $n = 7 \cdot 10^6 \text{ cm}^{-3}$ при среднем диаметре $d \approx 0.3 \text{ }\mu\text{m}$, объемная концентрация дыма $C = 0.3 \text{ g/m}^3$, расстояние визуальной видимости L белого объекта размером $100 \times 100 \text{ cm}$

$L = 0.3$ m. Самопроизвольный распад дыма с указанными характеристиками происходил за ≈ 200 min.

После создания однородного дымового аэрозоля в камеру подавался заряженный водный аэрозоль, получившийся путем пневматического распыливания воды с одновременной индукционной зарядкой капель [9]. В качестве диспергирующего газа использовался сжатый воздух с давлением $\approx 3 \cdot 10^6$ Pa, факел распыла создавался по большой диагонали камеры. Распределение капель по радиусам r в факеле распыления имело вид [10]:

$$dN \sim r^p \exp(-\beta r^q) dr,$$

при $p \approx 2$, $q \approx 0.75$, с максимумом при $r \approx 2 \mu\text{m}$.

3. В ходе эксперимента выяснилось, что наиболее быстрое снижение счетной концентрации аэрозольных частиц происходило при воздействии на задымленную среду каплями воды со средним диаметром $d_* \approx 5 \mu\text{m}$, несущими заряд q , соответствующий значению параметра Рэлея W , характеризующего устойчивость капли по отношению к собственному нескомпенсированному заряду, $W = q^2/2\pi\sigma d^3 \approx 0.2$ от предельного (равного единице) [8], σ — коэффициент поверхностного натяжения воды. В камеру при этом распылялось $m = 40$ g воды за 90 s. После прекращения распыления результирующая аэрозольная система быстро, в течение 40–50 s распалась. Счетная концентрация дымовых частиц при этом уменьшалась на 93%, расстояние визуальной видимости увеличивалось с 0.3 до 4.5 m, а изменение весовой объемной концентрации частиц дыма C в результате воздействия водного аэрозоля не отличалось от соответствующего изменения при самопроизвольном распаде дыма. Это указывает на то, что действие заряженных капелек воды на задымленную среду носит объемный характер, т.е. вероятная физическая причина наблюдаемого эффекта состоит в быстрой коагуляции дымовых частиц и капель воды.

О кинетике распада аэродисперсной системы судили по изменению во времени величины фототока трансмиссометра (рис. 1), величина которого растет с уменьшением концентрации частиц n . Кривая 1 соответствует оптимальному режиму воздействия ($d = 5 \mu\text{m}$; $n = 40$ g). По мере увеличения m монотонный характер изменения $I(t)$ нарушается. Уже при распылении $m = 65$ g воды в системе кратковременно образуется неустойчивый туман. Величина $I(t)$ резко падает еще до окончания распыления (кривая 2) (что соответствует ухудшению условий прохо-

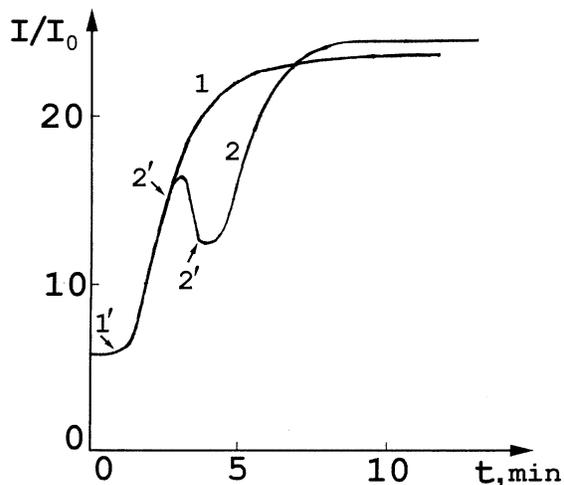


Рис. 1. Зависимость прозрачности (в отн. ед.) аэрозольной системы от времени наблюдения при введении в него за 90 с высокодисперсного заряженного водного аэрозоля: 1) $m = 40$ g, 2) $m = 90$ g. $1'$, $2'$ — начало и конец распыления воды. На кривой 2 после окончания введения водного аэрозоля отмечается временное снижение прозрачности системы, связанное с образованием тумана.

ждения излучения сквозь суммарную аэродисперсную систему). После испарения и распада тумана ток $I(t)$ снова начинает расти еще более быстрыми темпами, чем в первом случае (см. кривую 2 на рис. 1), до полного распада результирующего аэрозоля.

Результаты экспериментов показали, что при естественном развитии дыма с концентрацией $\sim 10^6 \text{ cm}^{-3}$ в замкнутом объеме броуновская коагуляция не приводит к существенному увеличению радиуса агломератов частиц дыма, достаточных для включения гравитационных эффектов (для выпадения крупных частиц на дно), даже за несколько часов. Об этом свидетельствует снятая экспериментально зависимость величины фототока от концентрации частиц дыма $I = I(C)$ при естественном распаде аэрозоля без всяких внешних воздействий, обозначенная на рис. 2 кружочками: первый кружочек соответствует 5 min от начала процесса, второй — 20 min, третий и все последующие экспериментальные точки снимались через 40 min друг после друга (последний седьмой кружочек

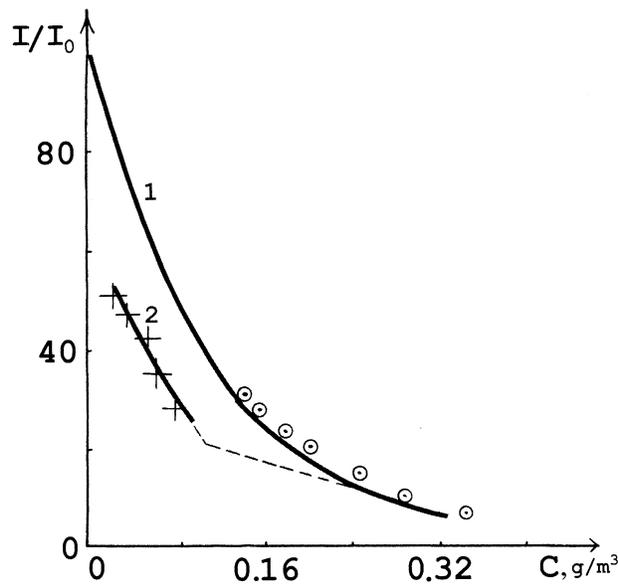


Рис. 2. Зависимость прозрачности (в отн. ед.) аэрозольной системы от массовой концентрации аэрозоля. Кружочками отмечены данные, относящиеся к дыму, не подверженному действию заряженного водного аэрозоля (цифрой 1 обозначена соответствующая закону Бугера теоретическая зависимость); крестиками — к дыму, в который вводился заряженный водный аэрозоль (цифрой 2 обозначена соответствующая закону Бугера для данной ситуации теоретическая зависимость).

соответствует 200 min). Соответствующая теоретическая кривая для закона Бугера обозначена цифрой 1. Сам закон Бугера

$$F/F_0 = \exp(-\gamma l) \quad (1)$$

показывает, во сколько раз ослабляется световой поток, проходя в среде с коэффициентом экстинкции γ расстояние l . Для нижеследующих рассуждений важно, что коэффициент экстинкции γ пропорционален квадрату линейного размера (площади поперечного сечения) рассеивающей свет частицы [11]. Кроме того, из (1) следует аналогичное

соотношение для интенсивности фототока в аэрозольной камере:

$$I/I_0 = \exp(-\gamma l). \quad (2)$$

Кривые 1 и 2 на рис. 2 как раз и рассчитаны по соотношению (2).

При введении (в течение ≈ 180 s) в аэрозоль заряженного водного аэрозоля, из расчета 4 г на м^3 , экспериментальные точки, обозначенные крестиками, укладываются на теоретическую кривую 2, которой соответствует в четыре раза большее значение показателя степени в законе Бугера, т.е. в четыре раза большее значение коэффициента экстинкции γ . Это свидетельствует об укрупнении вдвое характерного линейного размера частицы дыма на стадии его зарядки при введении заряженного водного аэрозоля (обозначено на рис. 2 пунктиром). По окончании введения заряженного водного аэрозоля укрупнения частиц дыма и изменения γ не происходило, на что указывает отличное согласие экспериментальных точек с монотонной кривой 2, соответствующей закону Бугера с большим значением коэффициента экстинкции. Отметим, что в этой серии опытов первая экспериментальная точка снималась через 15 min после введения заряженного водного аэрозоля, а все последующие — через 25 min друг после друга.

Отметим, что результаты экспериментов, приведенные на рис. 2, впервые прямо указывают на физический механизм быстрого рассеяния оптически плотных аэрозольных сред введением сильно заряженного жидкокапельного аэрозоля: на начальной стадии воздействия за счет поляризационных электростатических сил, обеспечивающих притяжение нейтральной частицы к заряженной, происходит укрупнение частиц аэрозоля, на финальной стадии включается механизм электростатического расталкивания униполярно заряженных крупных частиц.

Если в аэрозольной камере создавалась 100%-ная влажность, при которой частицы дыма абсорбировали водяные пары до полного насыщения, то эффекта ускорения распада дымного аэрозоля при введении заряженного жидкокапельного аэрозоля не наблюдалось.

4. Заключение. Эффект быстрого рассеивания оптически плотных аэродисперсных систем введением в них сильно заряженного жидкокапельного аэрозоля связан с ускорением коагуляции аэрозольных частиц, их укрупнением и электростатическим расталкиванием образовавшихся заряженных агломератов (в условиях замкнутого помещения — с уходом агломерированного заряженного дымного аэрозоля на стенки).

Список литературы

- [1] *Левин Л.М.* Исследования по физике грубодисперсных аэрозолей. М.: Изд. АН СССР, 1961. 267 с.
- [2] *Макальский Л.М.* // Применение электронно-ионной технологии в народном хозяйстве: Сборник. М.: Изд. МЭИ, 1991. С. 202–215.
- [3] *Салов В.А.* // Шестнадцатая конференция стран СНГ по вопросам испарения, горения и газовой динамики дисперсных систем. Тез. докл. 21–24 сентября 1993 г. Одесса, 1993. С. 42.
- [4] *Копыт Н.Х., Салов В.А., Есипович С.И.* // Дисперсные системы. Тез. докл. 18-й конференции стран СНГ. 23–27 сентября 1996. Одесса, 1996. С. 90–91.
- [5] *Салов В.А., Салов В.В.* // Дисперсные системы. Тез. докл. 19-й конференции стран СНГ. 25–29 сентября 2000 г. Одесса, 2000. С. 165.
- [6] *Григорьев А.И., Салов В.А., Сыщиков Ю.В., Ширяева С.О.* // ЖПХ. 1990. В. 7. С. 1524–1529.
- [7] *Ширяева С.О., Григорьева И.Д., Салов В.А.* // Письма в ЖТФ. 1994. Т. 20. В. 5. С. 76–80.
- [8] *Григорьев А.И., Ширяева С.О.* // ЖТФ. 1991. Т. 61. В. 3. С. 19–28.
- [9] *Таммет Х.Ф.* // Труды по электроионизации и электроаэрозольям. Рига, 1963. В. 140. С. 28.
- [10] *Пажси Д.Г., Галустов В.С.* Распылители жидкостей. М.: Химия, 1979. 214 с.
- [11] *Райст П.* Аэрозоли. М.: Мир, 1987. 278 с.