

Конденсация пара в присутствии ионизирующих воздействий

Г.Ф. Крымский², В.В. Колосов¹, И.С. Тырышкин^{1*}

¹Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634021, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1

²Институт космических исследований и аэронавтики им. Ю.Г. Шафера СО РАН
677980, г. Якутск, пр. Ленина, 31

Поступила в редакцию 18.06.2010 г.

Представлены экспериментальные исследования влияния ионизирующего действия пучка электронов и статического электричества на процесс конденсации водяных паров при различных режимах формирования пересыщения водяного пара. Исследования проводились на экспериментальной установке, созданной на базе атмосферной оптической кюветы, представляющей собой трубу из нержавеющей стали с внутренним диаметром 0,7 и длиной 112 м. В данной установке пересыщение водяного пара создается подобно камерам Вильсона второго типа сбросом давления из рабочей камеры сравнительно малого объема в вакуумизированную камеру с большим объемом, что позволяет достигать существенных значений степени пересыщения водяного пара. В проведенной серии экспериментов отчетливо проявляется зависимость характера сигнала, вызванного рассеянным излучением на конденсирующихся каплях при расширении паровоздушной смеси, от факторов, влияющих на ионизацию данной смеси. Полученные результаты указывают на существенную зависимость динамики каплеобразования от степени ионизации воздуха.

Ключевые слова: пересыщенный пар, конденсация, ионизация, облакообразование; supersaturated vapor, condensation, ionization, cloud formation.

Введение

В последние годы резко возрос интерес к исследованию влияния ионизирующих излучений из космоса на облакообразование (см., например, [1–3]) и грозовую активность [4, 5]. Сущность этого явления заключается в том, что переохлажденному водяному пару необходимы так называемые ядра конденсации, чтобы образовывать капельки воды. Ими могут быть частицы пыли, но на высоте более 1 км их немного. Космические лучи производят ионизацию на высоте облаков и способствуют образованию капелек воды, из которых и формируется облако [1–3]. На этой основе предлагаются новые механизмы формирования грозового облака и появления молний [5].

В настоящей статье рассмотрено влияние пучка электронов и статического электричества на процесс конденсации водяных паров при различных режимах пересыщения водяного пара и ионизации воздуха.

Измерения проводились на установке, детально описанной в [6]. Принцип ее действия основан на регистрации капель воды, образующихся в результате конденсации водяного пара на различных центрах конденсации при его пересыщении. Заданный уровень пересыщения водяного пара создается по-

добно камерам Вильсона второго типа [7] при сбросе давления из рабочей камеры объемом 1,5 м³ в вакуумизированную емкость объемом около 43,5 м³. Контроль за появлением в камере конденсированного аэрозоля в процессе сброса давления осуществляется путем регистрации сигнала, рассеянного под углом 2° к направлению распространения лазерного пучка. Параллельно осуществляется измерение давления в рабочей камере, что позволяет определять степень пересыщения пара, для которой наблюдается образование рассеивающих (т.е. достаточно крупных) капелек.

Зависимость сигналов рассеяния от скорости сброса давления

В экспериментах, представленных в [6], было установлено, что при достаточно быстром сбросе давления, обеспечивающем практически адиабатическое расширение парогазовой смеси в камере, наблюдается появление последовательности из трех пиков в рассеивающем сигнале. Первый пик появляется при небольших пересыщениях пара и соответствует образованию капелек воды на частичках пыли. Появление второго пика происходит при падении давления на 0,72–0,74 от начального давления смеси. При этом пересыщение водяного пара $S = 3,9 \div 4,54$, что соответствует пересыщению, при котором наблюдается конденсация паров воды на ионах [7]. Природа третьего пика неоднозначна [6].

* Гермоген Филиппович Крымский (krumsky@ikfia.usn.ru); Валерий Викторович Колосов (kvv@iao.ru); Иван Семенович Тырышкин.

Такая методика эксперимента позволяет разделить во времени процессы конденсации пара на частичках пыли и на ионах и исследовать влияние различных факторов на динамику этих процессов.

Прежде чем представить результаты экспериментов по влиянию ионизирующих факторов на каплеобразование, рассмотрим результаты экспериментов по регистрации динамики образования капель воды в зависимости от скорости сброса давления из камеры. Как и в [6], индикатором динамики образования капель служило рассеянное ими излучение гелий-неонового лазера. Напуск воздуха в камеру производился из лабораторной комнаты, в которой поддерживались постоянные влажность и температура. После напуска вентиль, через который производится напуск, закрывался. За счет испарения жидкой воды, находящейся на дне камеры, относительная влажность воздуха поддерживалась близкой к 100%.

Спустя 30 мин после напуска осуществлялся сброс давления из камеры в кювету путем открытия электромагнитного клапана. Давление в кювете поддерживалось на уровне, не превышающем 1 мм рт. ст., а управление скоростью сброса осуществлялось с помощью регулируемого вентиля, через который происходило стравливание воздуха.

Эксперимент начинался с малых скоростей стравливания. Для каждого положения регулируемого вентиля осуществлялось 5–6 напусков-сбросов. Затем регулируемый вентиль устанавливался на большее пропускание и цикл повторялся. С возрастанием скорости сброса давления из камеры процесс каплеобразования протекал более интенсивно, и в результате возрастал сигнал рассеяния излучения на образующихся каплях. Если уровень сигнала превышал динамический диапазон регистрирующей аппаратуры, то перед фотоприемником, регистрирующим рассеянное излучение, устанавливался нейтральный светофильтр, а напуск-сброс повторялся. При обработке результаты измерений, полученные за один цикл, усреднялись. Более детально методика эксперимента описана в [6].

Согласно теоретическим представлениям давление в камере должно падать по экспоненциальному закону. Это подтверждается сравнением экспериментальных результатов и результатов подгонки. Экспонента вида $P(t) = P_1 \exp(-t/t_1)$ подгонялась к спадающей части экспериментально записанной кривой от датчика давления. Параметрами подгонки выступали значения давления P_1 и времени t_1 . Пример результата подгонки приведен на рис. 1. Видно, что в представленных экспериментах сброс давления происходил практически экспоненциально.

Скорость уменьшения давления в различных экспериментах может быть охарактеризована начальной скоростью сброса давления $v = P_1/t_1$. Из анализа полученных результатов следует, что при начальных скоростях сброса давления менее $v = 1$ мм рт. ст./с конденсация не происходит ни на частичках, ни на ионах. Это объясняется тем, что при малых скоростях сброса давления процесс расширения воздуха в камере не является адиабатическим и при таком расширении не достигается необходимых пересыщений пара даже для его конденсации на частичках пыли.

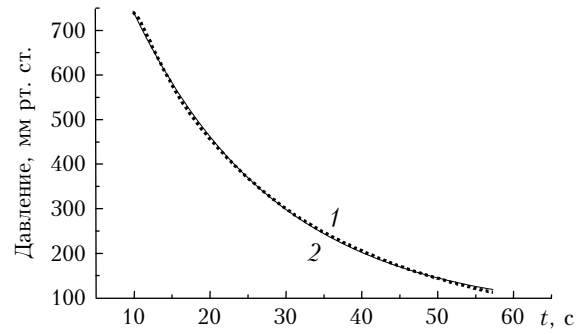


Рис. 1. Результаты подгонки: 1 – эксперимент, 2 – результат подгонки

С возрастанием скорости сброса давления процесс расширения начинает приближаться к адиабатическому и происходит пересыщение пара. При $v = 1,5$ мм рт. ст./с заметны незначительные колебания сигнала рассеяния в области давлений, соответствующих конденсации на частицах (рис. 2, а).

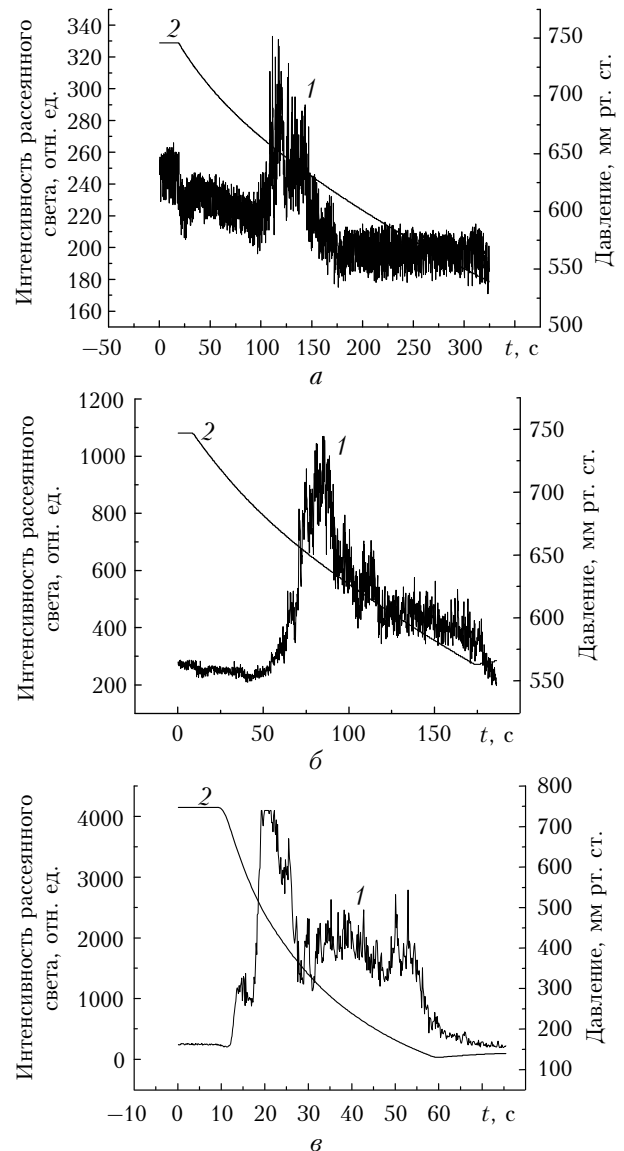


Рис. 2. Кривые рассеяния излучения (1) при скоростях сброса давления (2) 1,5 (а); 2 (б); 30 мм рт. ст./с (в)

При скорости v , равной и большей 2 мм рт. ст./с, наблюдается «полноценная» конденсация на частицах, в то время как конденсация на ионах (второй пик рассеяния) отсутствует (рис. 2, б), так как таких скоростей сброса давления недостаточно, чтобы достичь пресыщения, необходимого для конденсации капель на ионах [6].

Дальнейшее увеличение скорости сброса давления приводит к появлению второго пика рассеяния, связанного с конденсацией пара на ионах (рис. 2, в). При этом увеличение скорости ведет к непрерывному росту данного сигнала рассеяния (рис. 2, в), в то время как сигнал рассеяния, связанный с конденсацией пара на частицах (первый пик), практически не изменяется (рис. 2, б и в).

Зависимости интенсивности рассеянного излучения от скорости сброса давления приведены на рис. 3. Значения интенсивности получены усреднением по циклу из 5–6 напусков-сбросов для каждого положения регулируемого вентиля.

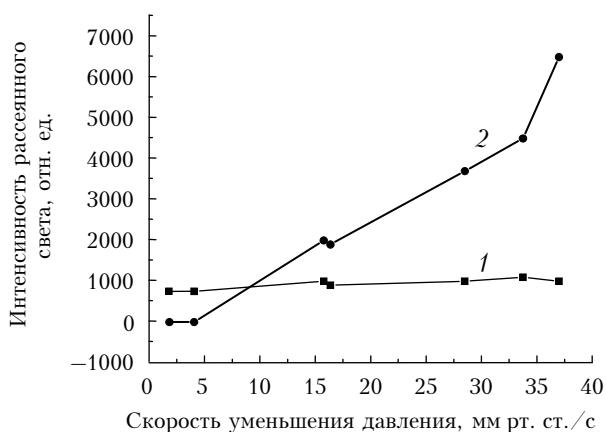


Рис. 3. Зависимость максимальной интенсивности рассеянного излучения от скорости сброса давления для сигнала рассеяния на каплях, конденсировавшихся на частичках пыли (1) (первый пик, см. рис. 2) и на ионах (2) (второй пик, см. рис. 2, в)

Видно, что при наблюдавшихся скоростях сброса давления интенсивность излучения, рассеянного каплями, образовавшимися на ионах, монотонно возрастает, в то время как сигнал рассеяния на каплях, возникших на частицах пыли, остается постоянным.

Влияние электронного пучка на интенсивность рассеянного излучения

Исследование влияния электронного пучка на интенсивность рассеянного излучения проводилось при начальной скорости изменения давления в камере около 20 мм рт. ст./с. В остальном методика измерений совпадает с методикой, по которой проводились исследования зависимости интенсивности рассеянного излучения от скорости сброса давления.

Для выравнивания температур камеры и воздуха, охлаждающегося за счет расширения при напуске, сброс воздуха из камеры и измерения сигнала рассеяния и давления в камере начинались спустя 1 ч после напуска. Начало сброса давления (открытие электромагнитного клапана) производилось спустя 1–3 с после запуска источника электронов. Все реализации напусков-сбросов воздуха при начальных давлениях в камере от 50 до 750 мм рт. ст. показали резкое увеличение амплитуды и длительности второго (ионного) пика рассеянного сигнала по сравнению с экспериментами, проводимыми без облучения паровоздушной смеси в камере электронным пучком.

На рис. 4 приведена запись сигналов рассеяния и изменения давления при начальном давлении в камере 400 мм рт. ст.

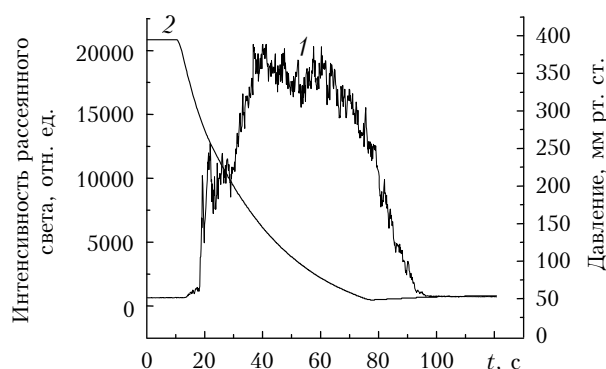


Рис. 4. Сигналы рассеяния излучения (1) лазера и изменения давления (2)

Сравнение результатов, представленных на рис. 4, с результатами на рис. 2 и 3, показывает, что интенсивность рассеяния на каплях, конденсация которых происходит на ионах, увеличилась более чем в 10 раз, а длительность примерно в 2 раза. В то же время сигнал рассеяния первого пика, связанного с конденсацией капель на частицах пыли, изменился незначительно.

Для получения точных количественных результатов необходимо в процессе измерений рассеяния проводить измерения энергетических характеристик пучка электронов. Данные эксперименты выполнены без таких измерений. Однако на их основе можно сделать заключение о присутствии значимой зависимости рассеянного сигнала от воздействия электронного пучка на паровоздушную смесь в камере и, следовательно, о влиянии ионизирующего воздействия электронного пучка на динамику образования капель воды.

Зависимость сигналов рассеяния от напряженности электрического поля

Ионизация воздуха в камере с помощью коронного разряда использовалась нами для ускорения очистки камеры. Для этого вместо центрального электрода (см. схему установки в [6]) в камеру

устанавливалась токопроводящая пластина с набором закрепленных на ней заостренных тонких проволок. Пластина подключалась к источнику с напряжением порядка 20 кВ, и производилась серия напусков-сбросов воздуха. После очистки центральный электрод возвращался на место. Однако было замечено, что и со шлифованным электродом сигнал рассеяния излучения в присутствии электростатического поля больше.

Исследование зависимости интенсивности рассеянного излучения от напряженности электрического поля в камере проводилось при начальной скорости изменения давления в камере около 20 мм рт. ст./с. Напряжение на центральный электрод подавалось после напуска воздуха в камеру на время около 10–15 мин и снималось перед сбросом давления. В остальном методика измерений совпадает с методикой, по которой проводились исследования зависимости интенсивности рассеянного излучения от скорости сброса давления. Результаты измерений приведены на рис. 5.

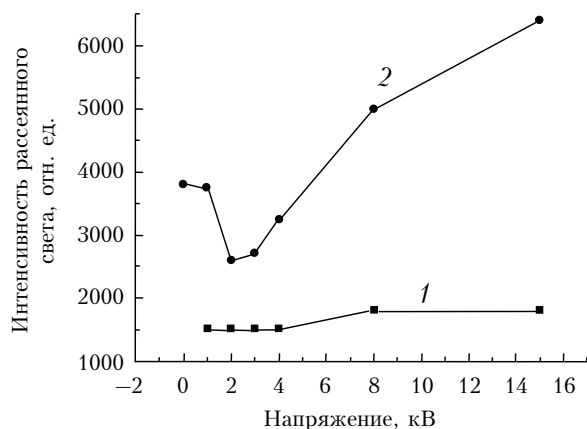


Рис. 5. Зависимость интенсивности рассеянного излучения от напряженности электрического поля в камере. Рассеяние на каплях, конденсированных на частицах пыли, — 1, на ионах — 2

Каждая точка на рис. 5 получена усреднением результатов одного цикла измерений, состоявшего из 5 реализаций напусков-сбросов. Как и в случае изменения скорости сброса давления, усредненное значение первого пика рассеяния, который мы определяем как пик рассеяния на каплях, конденсиро-

ванных на частицах пыли («грязный пик»), в случае изменения напряженности поля в камере изменяется сравнительно в небольших пределах. Наблюдаемое изменение среднего значения сигнала рассеяния второго (ионного) пика является выраженным и намного превосходит разброс экспериментальных значений.

Видно, что при напряжении приблизительно 2000 В наблюдается уменьшение сигнала рассеянного излучения более чем в 1,5 раза. Данное уменьшение мы связываем с возникновением «очищающего поля» [7], появление которого вызывает уменьшение числа заряженных частиц в объеме.

При дальнейшем увеличении напряженности поля наблюдается рост сигнала рассеяния. Этот эффект, возможно, связан с ростом числа ионов вследствие появления коронного разряда на неровностях центрального электрода, сетки и юстировочного узла зеркала (см. схему эксперимента, представленную в [6]).

В проведенной серии экспериментов отчетливо проявляется существенная зависимость характера сигнала, вызванного рассеянным излучением на конденсирующихся каплях при расширении паровоздушной смеси, от факторов, влияющих на ионизацию данной смеси. К таким факторам относится воздействие электронного пучка и статического электричества. Следовательно, можно сделать вывод о существенной зависимости динамики каплеобразования от степени ионизации воздуха.

1. Marsh N., Svensmark H. Cosmic Rays, Clouds and Climate // Space Sci. Rev. 2000. V. 94, N 1–2. P. 215–230.
2. Andreas M., Enghoff B., Svensmark H. The role of atmospheric ions in aerosol nucleation: a review // Atmos. Chem. and Phys. 2008. V. 8, N 16. P. 4911–4923.
3. Крымский Г.Ф. Космические лучи и погода // Наука и техника в Якутии. 2005. № 1(8). С. 3–6.
4. Ермаков В.И., Стожков Ю.И. Роль космических лучей в образовании молний // Краткие сообщения по физике. ФИАН. 2003. № 9. С. 43–50.
5. Ермаков В.И., Стожков Ю.И. Физика грозных облаков. Препр. / ФИАН. (М.). 2004. № 2. 21 с.
6. Крымский Г.Ф., Колосов В.В., Ростов А.П., Тырышкин И.С. Установка для исследования нуклеации водяных паров в искусственной атмосфере // Оптика атмосф. и океана. 2010. Т. 23, № 9. С. 820–825.
7. Дас Гунта Н.Н., Гош С.К. Камера Вильсона и ее применения в физике // Успехи физ. наук. 1947. Т. 31, № 4. С. 491–583.

G.A. Krymskii, V.V. Kolosov, I.S. Tyryshkin. Vapor condensation under the ionizing effect.

In this work, experimental investigations are presented of the ionizing effect of electron beam and static electricity on the water vapor condensation in different conditions of supersaturation. The experimental setup was designed on the basis of an atmospheric optical cell, which is a tube of 0.7 m in inner diameter and 112 m in length made of stainless steel. In this setup, supersaturation of water vapor is performed by means of pressure release from a working chamber of a comparatively small volume to a vacuumized chamber of larger volume like in second type Wilson chambers; this allows significant degrees of water vapor supersaturation. The performed experiments show a pronounced dependence of the signal, caused by radiation scattering by drops formed in expansion of the air-vapor mixture, on factors influencing the mixture ionization. The results point out to a significant dependence of the drop-formation dynamics on the degree of air ionization.