

ИССЛЕДОВАНИЯ КОНДЕНСАЦИИ ПЕРЕСЫЩЕННОГО ВОДЯНОГО ПАРА ПРИ ИОНИЗАЦИИ АТМОСФЕРЫ И СОПУТСТВУЮЩЕГО ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКОГО ИК-ИЗЛУЧЕНИЯ

¹Ю.Н. Пономарев, ¹А.В. Климкин, ²А.С. Козлов, ¹В.В. Колосов, ³Г.Ф. Крымский,
¹А.Н. Куряк, ²С.Б. Малышкин, ²А.К. Петров

STUDIES OF THE CONDENSATION OF SUPERSATURATED WATER VAPOR ASSOCIATED WITH ATMOSPHERIC IONIZATION AND ITS ACCOMPANYING CHARACTERISTIC IR EMISSION

¹Yu. Ponomarev, ¹A. Klimkin, ²A. Kozlov, ¹V. Kolosov, ³G. Krymskiy,
¹A. Kuryak, ²S. Malyshev, ²A. Petrov

В работе описывается модернизированная система создания пересыщенных паров H_2O и контроля их термодинамических параметров в условиях низких давлений на стенде ИОА СО РАН. В ходе работ отработаны методика контроля кинетики концентрации мономера H_2O и появления капель по поглощению и рассеянию лазерного излучения, методика селекции образующегося аэрозоля по размерам при понижении давления и при воздействии пучка электронов на пересыщенный водяной пар.

The paper describes the upgraded system for generation of supersaturated H_2O vapor. It was created on the basis of the unique IAO SB RAS stand. The system controls the thermodynamic parameters of vapor under low pressure. Besides, the method for monitoring kinetics of H_2O monomer concentration was verified. The droplet formation technique was tested through absorption and scattering of laser radiation. We elaborated the method for selecting the generated aerosol by size when pressure goes down and when supersaturated water vapor is under the action of an electron beam.

Облака в атмосфере оказывают существенное влияние на погодные условия, играют значительную роль в процессах обмена энергией между Солнцем, поверхностью Земли и атмосферой. Проводимая авторами серия работ посвящена изучению механизмов образования облаков, процессов, протекающих в них на разных стадиях образования, оценке влияния космического излучения и других природных и антропогенных факторов на эти процессы. Для образования капель в охлажденном водяном паре необходимы центры конденсации. Такими центрами могут выступать заряженные частицы и частицы пыли [Marsh, 2000; Andreas, 2008; Крымский, 2005]. Описываемые эксперименты направлены на изучение их влияния на облакообразование. Для изучения этого процесса в ИОА СО РАН была создана установка (рис. 1) на базе атмосферной кюветы КА-1 [Пonomarev, 1993, 1998]. Общая длина кюветы 112 м, диаметр 0.7 м, на торцах кюветы расположены увеличенные части диаметром 1.4 м, предназначенные для монтажа оборудования. Для создания установки кювета 1 была разделена перегородкой 19 на две камеры [Крымский, 2010а]: малую, состоящую из одной расширенной части кюветы объемом 1.5 м^3 , и большую, служащую буферным объемом, – соединенные между собой воздушным клапаном 10. В установке, как и в камере Вильсона 2-го типа, пересыщение водяного пара создается сбросом давления из малой камеры в большую.

Откачка воздуха из кюветы до давления 10^{-2} мм рт. ст. происходит при открытом вакуумном клапане 10 через клапан 12. Затем клапан 10 перекрывается и через систему фильтров и клапан 11 в малую камеру подается воздух контролируемой влажности и температуры, пока давление в камере не достигнет 500 мм рт. ст. После доведения влажности воздуха в малой камере до 100 %, что достигается размещением в камере объема с водой, происходит контролируемый «сброс» давления из малой камеры в большую и образование в малой камере аэрозоля.

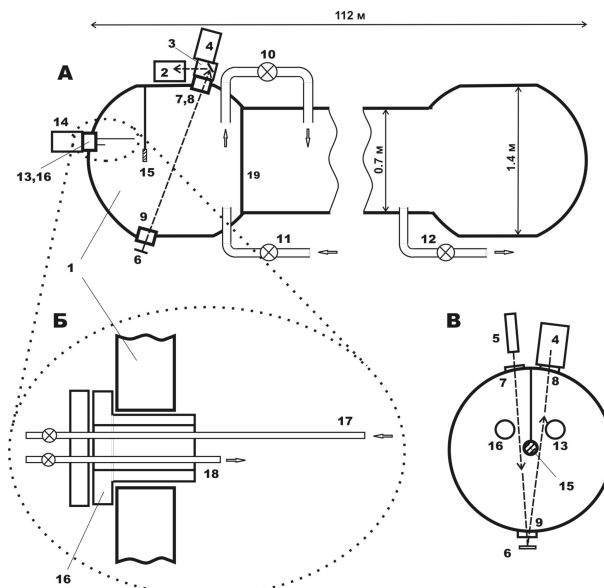


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: А – общая схема установки; Б – фланец подключения фотоэлектрического спектрометра аэрозоля; В – торец кюветы. 1 – кювета; 2, 4 – фотоприемные блоки; 3 – блок с поворотным зеркалом; 5 – лазер; 6 – зеркало; 7, 8, 9 – фланцы с окнами; 10, 11, 12 – вакуумные клапаны; 13 – фланец крепления источника электронов; 14 – источник электронов; 15 – электрод; 16 – фланец подключения фотоэлектрического спектрометра аэрозоля; 17 – трубка забора воздуха; 18 – трубка сброса воздуха; 19 – перегородка.

В качестве источника электронов 14 используется малогабаритный импульсный ускоритель электронов [Тарасенко, 2003] с энергией пучка электронов не ниже 80 кэВ.

Всю серию экспериментов можно разделить на две части. В первой части экспериментов [Крымский, 2010а, б] исследовались условия образования аэрозоля при различной скорости сброса давления и разной степени очистки кюветы, а также при воздействии электронным пучком ускорителя электронов

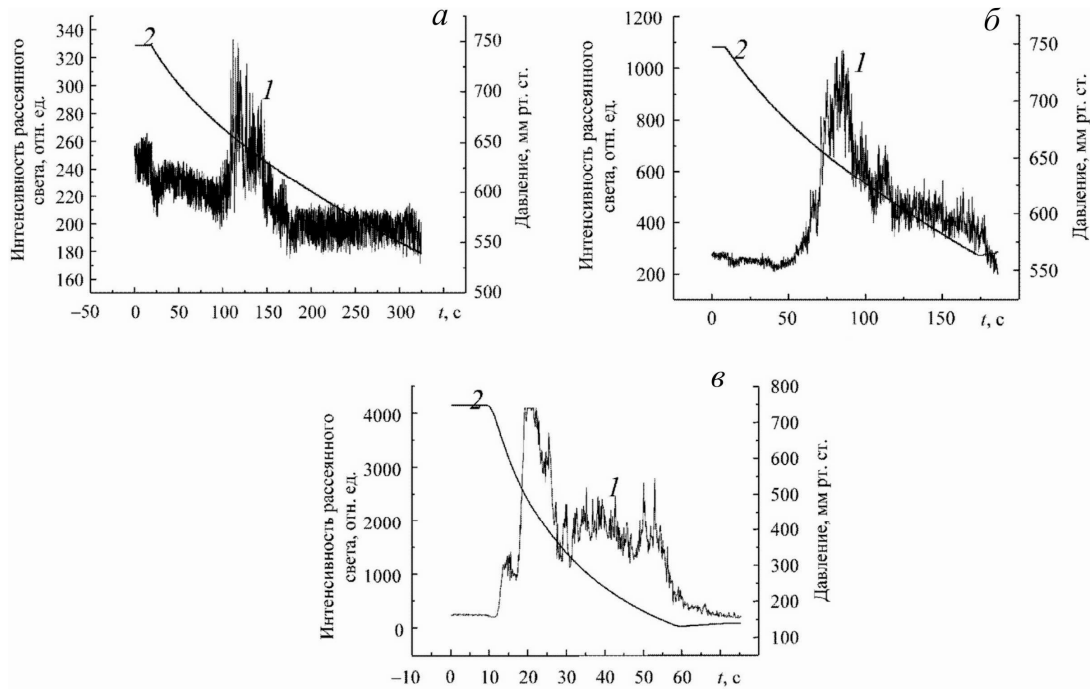


Рис. 2. Кривые рассеяния излучения 1 при различных скоростях сброса давления 2: а – 1.5; б – 2; в – 30 мм рт. ст./с.

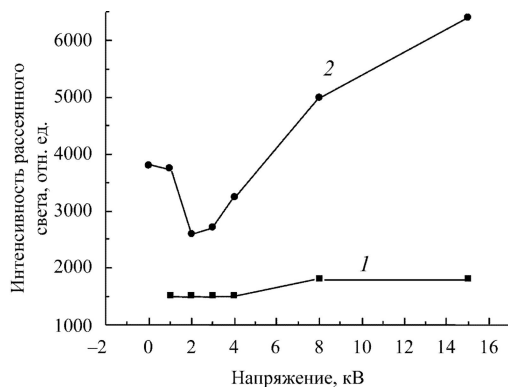


Рис. 3. Зависимость интенсивности рассеянного излучения от напряженности электрического поля в камере. Рассеяние на каплях, конденсированных на частицах пыли, – кривая 1, на ионах – кривая 2.

на насыщенный водяной пар при различном остаточном давлении в кювете. В этих экспериментах излучение лазера 5 проходит через парогазовую смесь в камере. Зеркало 6 направляет излучение на поворотное зеркало в блоке 3 и от него в блок фотоприемника 2. После сброса давления в камере и образования аэрозоля часть рассеянного на аэрозоле излучения лазера проходит в блоке 3 мимо поворотного зеркала и попадает на фотоприемник блока 4. Фотоприемник отклонен от направления распространения лазерного пучка на 2° .

Было установлено, что при достаточно быстром сбросе давления, обеспечивающем практически адиабатическое расширение парогазовой смеси в камере, наблюдается появление последовательности трех пиков в сигнале рассеянного лазерного излучения. Первый пик появляется при небольших перепадах пара при сбросе давления до 0.92–0.95 от начального давления смеси и соответствует образованию капелек воды на частицах пыли («грязный»

пик) [Фольмер, 1986; Амелин, 1972]. Появление второго пика происходит при падении давления до 0.72–0.74 от начального и вызвано конденсацией паров воды на ионах («ионный» пик) [Дас Гупта, Гош, 1947]. Примерно в половине экспериментов вершина второго пика раздвоена, что может быть объяснено тем, что конденсация пара происходит раньше на отрицательных ионах, чем на положительных. Природа третьего пика, образующегося при давлении смеси 0.3–0.4 от начального, неоднозначна [Крымский, 2010а].

В экспериментах наблюдалось различное поведение пиков в зависимости от скорости сброса давления (рис. 2). При относительно малых скоростях сброса проявляется только «грязный» пик (рис. 2, а). При увеличении скорости наблюдались и увеличение этого пика, и появление «ионного» (рис. 2, б). Дальнейшее увеличение скорости сброса давления ведет к непрерывному росту второго пика сигнала рассеяния (рис. 2, в).

Исследования влияния электронного пучка, образуемого источником электронов (14 на рис. 1), на интенсивность рассеянного излучения показали незначительное увеличение рассеяния излучения на каплях, конденсированных на частицах пыли, и более чем десятикратное увеличение интенсивности и двукратное увеличение продолжительности рассеяния на каплях, конденсация которых происходит на ионах.

Для исследования зависимости интенсивности рассеянного излучения от напряженности электрического поля в камере установлен центральный электрод (15 на рис. 1). Как и в случае изменения скорости сброса давления, усредненное значение первого, «грязного» пика в случае изменения напряженности поля в камере изменяется относительно в небольших пределах (рис. 3). Наблюдаемое изменение среднего значения сигнала рассеяния второго, «ионного» пика является выраженным. Также видно, что

при напряжении приблизительно 2000 В наблюдалось уменьшение сигнала рассеянного излучения более чем в 1.5 раза, что, предположительно, связано с возникновением «очищающего» поля [Дас Гупта, Гош, 1947], появление которого вызывает уменьшение числа заряженных частиц в объеме. При дальнейшем увеличении напряженности поля наблюдался рост сигнала рассеяния. Этот эффект, возможно, связан с ростом числа ионов вследствие появления коронного разряда на неровностях центрального электрода и других частях установки.

При определенных условиях в атмосфере могут образовываться источники характеристического инфракрасного излучения [Tatartchenko, 2008; Татарченко, 2010]. Происхождение этих источников связано с переходами второго рода – конденсацией и кристаллизацией – и выделением частиц, участвующей в этих процессах, одного или нескольких фотонов. Для изучения этого явления в установку включен еще один фотоприемный блок. Излучение на него выводится из кюветы через прозрачное в видимой и инфракрасной области спектра окно, закрепленное на одном из фланцев. В качестве детектора используется фотоприемник МГ-30 с областью чувствительности 2–14 мкм.

В ходе экспериментов [Пономарев, 2010] было установлено, что интегральная интенсивность регистрируемого излучения при сбросе давления превышает интенсивность планковского излучения более чем в 10 раз, а более 50 % принимаемой энергии сосредоточено в области 3.3–5.5 мкм.

Во второй части экспериментов исследовались размеры частиц аэрозоля, образующегося в камере при сбросе давления. Для этого в установку через фланец 16 (см. рис. 1) включен аэрозольный спектрометр Scanning Mobility Particle Sizer 5.403 (SMPS) фирмы Grimm Aerosol Technik (Германия), состоящий из селективной колонки (где происходит разделение частиц по размерам) и блока регистрации частиц. Через трубку 17 осуществляется забор воздушно-капельной смеси из кюветы в спектрометр, через трубку 18 – ее возврат через аэрозольный фильтр в кювету.

При плавном сбросе давления с 500 мм рт. ст. всегда регистрировалось образование новых наночастиц. По нашему предположению, это начало образования капель, которые за время прохождения по трубке, соединяющей малую камеру и спектрометр, высыхают и оставляют в приборе лишь нанометровые ядра. По предварительным теоретическим подсчетам в кювете при сбрасывании давления образуется в литре до 10^4 – 10^5 капель диаметром до 80 мкм. На рис. 4 приведены распределения аэрозоля по размерам при давлении 340 и 400 мм рт. ст.

Исследование влияния электронного пучка на интенсивность образования аэрозоля проводилось при постоянном давлении в малой камере 370 мм рт. ст. и влажности воздуха 100 %. Как и ранее, в качестве источника электронов использовался ускоритель электронов 14 (см. рис. 1). После импульса ускорителя в объеме камеры образовывалось большое количество новых частиц, но при повторных импуль-

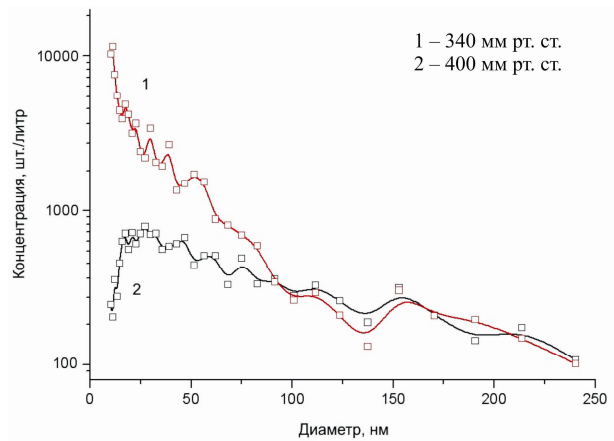


Рис. 4. Распределения по размерам частиц аэрозоля, образующихся при снижении давления.

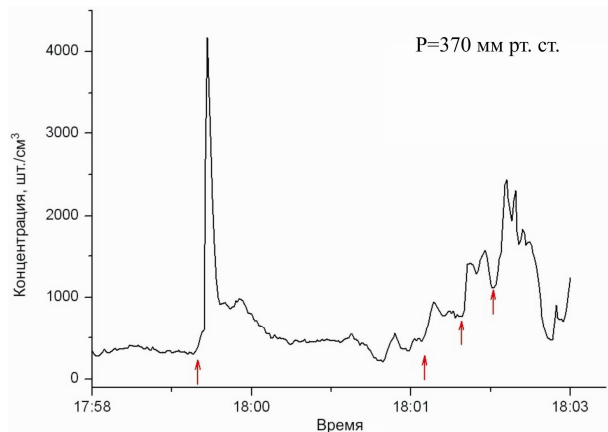


Рис. 5. Зависимость общей концентрации частиц с размером больше 10 нм от времени (стрелками показаны моменты воздействия пучка электронов).

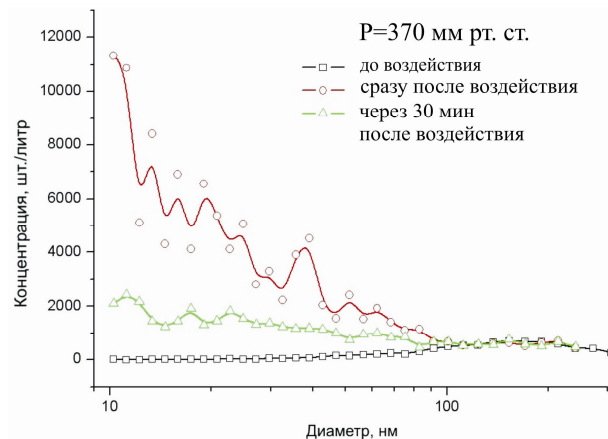


Рис. 6. Распределение частиц аэрозоля по размерам.

сах эффект уменьшался, что объясняется понижением влажности и оседанием капель на стенки камеры. На рис. 5 приведена зависимость концентрации частиц диаметром более 10 нм от времени при воздействии последовательности импульсов (стрелками указаны моменты срабатывания источника электронов). На рис. 6 – распределения аэрозоля по размерам в единице объема до импульса ускорителя, сразу после импульса и через 30 мин выжидания. Показаны образование новых ядер конденсации в резуль-

тате ионизирующего воздействия и их плавная «релаксация» со временем.

В дальнейшем предполагается провести исследование зависимости образования аэрозоля от напряженности электрического поля с применением спектрометра.

Итак, в ходе всей серии экспериментов успешно апробирована установка, позволяющая получать пересыщенный водяной пар по принципу камеры Вильсона, однако многократно превышающая такие стандартные камеры по рабочему объему. При сбросе давления от начального атмосферного давления до 30 мм рт. ст. наблюдалось последовательное появление трех пиков рассеяния сигнала. Довольно уверенно можно связать появление первых двух пиков с конденсацией паров воды сначала на частицах пыли и затем на ионах, природа третьего пика пока не ясна. Отчетливо проявляется зависимость характера сигнала, вызванного рассеянным излучением на конденсирующихся каплях при расширении паровоздушной смеси, от ее ионизации. К факторам, влияющим на ионизацию данной смеси, относится воздействие электронного пучка и статического электричества. Следовательно, можно сделать вывод о существенной зависимости динамики каплеобразования от степени ионизации воздуха.

Работа поддержана интеграционным проектом междисциплинарных фундаментальных исследований СО РАН № 79.

Авторы благодарят М.М. Макогону за участие в планировании эксперимента.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Амелин А.Г. Теоретические основы образования тумана: 3-е изд. М.: Химия, 1972. 304 с.

Дас Гупта Н.Н., Гош С.К. Камера Вильсона и ее применения в физике // Успехи физ. наук. 1947. Т. 31, № 4. С. 491–583.

Крымский Г.Ф. Космические лучи и погода // Наука и техника в Якутии. 2005. № 1(8). С. 3–6.

Крымский Г.Ф., Колосов В.В., Тырышкин И.С. Конденсация пара в присутствии ионизирующих воздействий // Оптика атмосферы и океана. 2010а. Т. 23, № 9. С. 826–829.

Крымский Г.Ф., Колосов В.В., Ростов А.П., Тырышкин И.С. Установка для исследования нуклеации водяных паров в искусственной атмосфере // Оптика атмосферы и океана. 2010б. Т. 23, № 9. С. 820–825.

Пономарев Ю.Н., Тырышкин И.С. Спектрофотометрический комплекс для измерения поглощения лазерного излучения ИК-, видимого и УФ-диапазонов молекулярными газами // Оптика атмосферы и океана. 1993. Т. 6, № 4. С. 360–368.

Пономарев Ю.Н., Тырышкин И.С. Спектрофотометрический комплекс на основе многоходовых кювет с базой 110 и 30 м // Региональный мониторинг атмосферы. Ч. III: Уникальные измерительные комплексы. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1998. С. 207–230.

Пономарев Ю.Н., Тырышкин И.С. Регистрация инфракрасного характеристического излучения при конденсации водяного пара в разреженной атмосфере // XVII рабочая группа «Аэрозоли Сибири». Томск, 23–24 ноября 2010. С. 37.

Тарасенко В.Ф., Яковленко С.И., Орловский В.М. и др. Получение мощных электронных пучков в плотных газах // Письма в ЖЭТФ. 2003. Т. 77, вып. 11. С. 737–742.

Татарченко В.А. Инфракрасное характеристическое излучение фазовых переходов первого рода и его связь с оптикой атмосферы // Оптика атмосферы и океана. 2010. Т. 23, № 3. С. 169–175.

Фольмер М. Кинетика образования новой фазы. М.: Наука, 1986. 208 с.

Andreas M., Enghoff B., Svensmark H. The role of atmospheric ions in aerosol nucleation: A review // Atmos. Chem. Phys. 2008. V. 8, N 16. P. 4911–4923.

Marsh N., Svensmark H. Cosmic rays, clouds and climate // Space Sci. Rev. 2000. V. 94, N 1–2. P. 215–230.

Tatartchenko V.A. Characteristic IR radiation accompanying crystallization and window of transparency for it // J. Cryst. Growth. 2008. V. 310, N 3. P. 525–529.

¹Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, Томск, Россия

²Институт химической кинетики и горения СО РАН, Новосибирск, Россия

³Институт космических исследований и аэронавтики им. Ю.Г. Шафера СО РАН, Якутск, Россия