

03

Модель образования капель при гомогенной конденсации паров воды в атмосфере на нейтральных и заряженных центрах

© О.А. Синкевич,^{1,2} Е.Ю. Скотаренко,² А.Н. Киреева²

¹ Объединенный институт высоких температур РАН,
125412 Москва, Россия

² Национальный исследовательский университет „МЭИ“,
111250 Москва, Россия
e-mail: KireevaAN@rambler.ru

Поступило в Редакцию 3 мая 2024 г.

В окончательной редакции 14 октября 2024 г.

Принято к публикации 28 октября 2024 г.

Рассмотрена гомогенная конденсация паров воды, находящихся во влажном воздухе в атмосфере, проявляющаяся при образовании облаков и туманов. Предложен метод расчета радиуса образовавшейся капли и параметров жидкости внутри нее. Исследованы особенности гомогенной конденсации, происходящей на центрах, несущих электрический заряд. Показано, что наличие электрического заряда, которое ведет к установлению электрического давления на границе капли, приводит к изменению радиуса капли и давления жидкости внутри нее.

Ключевые слова: радиус капли, давление Лапласа, поверхностное натяжение, теплообмен при конденсации, капля на заряженном центре.

DOI: 10.61011/JTF.2025.01.59458.117-24

Введение

Проблема образования капель воды в различных условиях и в особенности в атмосфере представляет большой интерес как для понимания протекающих процессов, так и для разработки методов воздействия на них: образование дождя и града, распространение электромагнитных и звуковых волн и т.д. Остановимся более подробно на проблемах конденсации воды на высотах от 1 до 3(5) km над уровнем моря. Как правило, основные результаты базируются на данных наблюдений. Их основной задачей было, в том числе желание получить функцию распределения (ФР) капель по размерам. Однако не меньший интерес представляли сами процессы испарения и конденсации и влияние на них электрических полей. Эта задача может охватывать и образование тумана и облаков, и их рассеивание.

Проблему образования капель можно разделить на две части: образование капель за счет конденсации паров воды в атмосфере при понижении температуры и дальнейшее взаимодействие капель между собой и окружающей средой. Случай конденсации в объеме и в особенности гомогенной конденсации изучен, на наш взгляд, недостаточно.

Оба процесса имеют разные характерные времена. Можно полагать, что процесс конденсации происходит за более короткое время, после чего начинает преобладать рост капель за счет других механизмов. Оценка времени гомогенной конденсации, полученная в настоящей работе, может быть использована для

анализа ФР капель по размерам, возникающей при столкновении капель друг с другом и с молекулами воздуха.

В работе [1] высказаны соображения о том, что для мелких капель рост в основном происходит за счет конденсации, а более крупные капли (порядка 50 μm и более) растут преимущественно за счет коагуляции. Но как определить тот характерный размер, до которого конденсация преобладает? Например, из экспериментальных данных [2] (рис. 1), по которым можно найти первоначальное число капель в атмосфере, вообще говоря, трудно определить минимальный размер, для которого существеннее конденсация паров. Сложность определения минимального размера капель связана как с различного рода помехами, которые существуют в атмосфере, так и с точностью приборов, используемых для определения размеров капель. Поэтому в литературе в большей мере обсуждается проблема распределения частиц по размерам. Поскольку для более детального анализа экспериментальных данных придется опираться именно на ФР, здесь стоит остановиться на известных работах, посвященных ее получению и анализу для туманов и облаков.

Данным проблемам посвящена обширная литература [2–7].

По-видимому, одной из первых достаточно фундаментальных работ, посвященных образованию тумана, была работа Шумана [6], который, опираясь на идеи Смолуховского [8], предложил интегро-дифференциальное

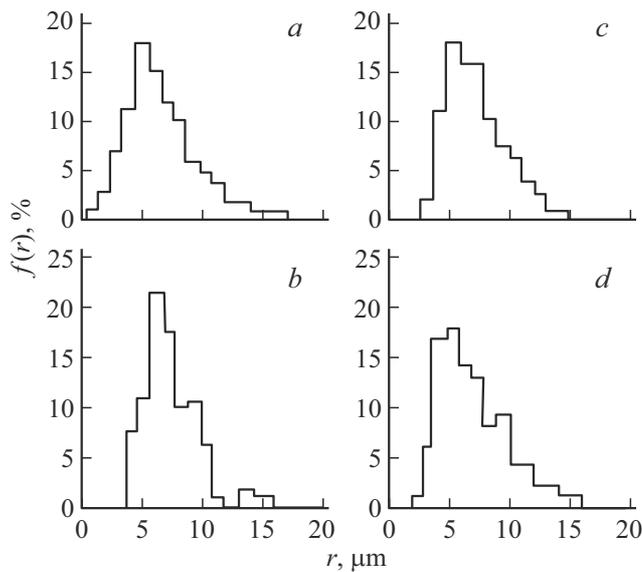


Рис. 1. Экспериментальные кривые плотности распределения капель облаков различных форм по размерам: *a* — общее число измеренных капель $N = 17\,269$, $r_1 = 6.8\ \mu\text{m}$; *b* — $N = 1029$, $r_1 = 7.6$; *c* — $N = 2469$, $r_1 = 7.1$; *d* — $N = 722$, $r_1 = 6.7$ [2] (r_1 — значение радиуса капли, соответствующее максимуму ФР).

уравнение для ФР капель по размерам:

$$\frac{dn}{dt} = -n \int_0^\infty f(u, v)n(u)du + \frac{1}{2} \int_0^v f(u, v-u)n(u)n(v-u)du. \quad (1)$$

Здесь $n(v, t)$ — ФР капель по объемам, зависящая от времени; t — время; $f(u, v)$ — частота столкновений капель объема v с каплями объема u , отнесенная к единице концентрации капель каждого размера.

В подходе автора есть два типа столкновений: столкновения капель данного объема с другими каплями разных размеров, которые приводят к тому, что капли данного объема исчезают, и столкновения капель разных размеров, приводящие к образованию капли данного радиуса. Во-первых, в своем подходе автор [6] считал, что частоты столкновений одинаковы и постоянны. А во-вторых, общее число капель изменяется по закону

$$\frac{dN}{dt} = -\frac{K}{2}N^2, \quad N = \frac{N_0}{1 + (1/2)KN_0t}, \quad (2)$$

где K — константа коагуляции, N_0 — начальное количество капель-зародышей в единице объема.

В результате из (1) получается следующее уравнение:

$$\frac{dn}{dt} = -KnN + \frac{1}{2}K \int_0^v n(u)n(v-u)du. \quad (3)$$

Используя выражение для N (2), а также ряд преобразований, автор [6] получил решение уравнения (3) в виде

$$n = \frac{N_0^2}{V \left(1 + \frac{KN_0t}{2}\right)^2} \exp\left(-\frac{N_0v}{V(1 + KN_0t/2)}\right), \quad (4)$$

где V — объем жидкости (всех капель) в единице объема.

Отметим еще раз, что в данном подходе необходимо знать частоты столкновений и характер изменения общего числа частиц.

Во-первых, это нестационарное решение содержит некоторую неизвестную величину N_0 . Во-вторых, хотя формально оно является решением, но выражение (4) дает неправильный результат о числе капель малого радиуса в единице объема при размере, стремящемся к нулю. Шуман в своей работе [6] опирался на экспериментальные данные [9], но сопоставлял их не с результатами расчета по формуле (4), полученной при решении уравнения (3), а со значениями функции, умноженной на объем, занимаемый частицей, т. е. на r^3 , в безразмерном виде:

$$y = x^5 \exp\{5(1 - x^3)/3\},$$

где y — приведенная ФР плотности вероятности появления капель с размером в диапазоне $r + dr$ (r — радиус капли), отнесенная к своему выражению при $r = r_m$; $x = r/r_m$ — приведенный радиус, r_m — значение радиуса капли, соответствующее максимуму ФР.

Видимо, поэтому работа [6] не нашла значительного отклика у других исследователей. Более серьезные попытки вернуться к этой проблеме предпринимались в публикациях [5,7,10–13]. Эти работы опираются на кинетическое уравнение для ФР, приведенное в [10] без вывода:

$$u \frac{\partial f}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial r}(rf) = \frac{I}{\rho} \delta(r - r_*). \quad (5)$$

Здесь u — продольная проекция скорости, x — продольная координата, δ — дельта-функция, r_* — радиус зародыша критического размера, \dot{r} — скорость изменения радиуса капли.

По всей видимости, впервые кинетическое уравнение (5) использовалось применительно к конденсирующемуся газу в работах [11,12]. Оно учитывает изменение радиуса частиц и включает в себя источник образования капель. В [5] кратко описан вывод основного кинетического уравнения.

Авторы [10–12] показали, что исходное уравнение допускает аналитическое решение в случае, когда скорость

роста капель не зависит от их размера. Тогда уравнение можно свести к системе обыкновенных дифференциальных уравнений для моментов ФР.

В более сложных ситуациях, используя известный подход к решению уравнения Больцмана, применяется метод моментов

$$\Omega_k = \int_{r_*}^{\infty} r^k f dr \quad (k = 0, 1, 2).$$

Дальнейшие более детальные исследования базировались на уравнении (5) с использованием метода моментов для его решения, но отличались выражением для скорости нуклеации. Для потока газа и применительно к конденсации паров его рассматривал Стернин [5], а далее Корценштейн с коллегами [13–15], которые развивали предложенный алгоритм решения уравнения (5) методом моментов.

Отметим, что в отличие от [6] данный подход не учитывает столкновения капель, а только рождение капель и изменение их радиусов во времени. Попытка частичного учета процесса столкновения капель приведена в работе [14], где первое уравнение в исходной системе дополнено слагаемым в соответствии с [16].

Более детальное рассмотрение проблемы определения ФР может являться предметом отдельного исследования.

Повторим цель работы, которая заключается в рассмотрении гомогенной конденсации паров воды во влажном воздухе, влияния на нее электрического поля, нахождении характерных времен этого процесса и полного первоначального числа частиц в единице объема, а также характерного радиуса образовавшейся капли.

Что касается влияния постоянных электрических полей от внешних источников на конденсацию на заряженных частицах, то их существенное воздействие может происходить при напряженностях поля, значительно превышающих напряженность, при которой развивается электрический пробой воздуха. Поэтому такие поля вряд ли могут реализовываться в тех условиях, при которых рассматривается задача о гомогенной конденсации. Показано, что при реально существующих полях воздействие на процесс мало. Представляет интерес влияние переменных электрических полей с колебаниями порядка радиочастотных (от 100 кГц до 10 МГц). Переменные поля могут приводить к параметрической раскачке колебаний отдельной капли, однако эта задача требует отдельного специального анализа.

1. Гомогенная конденсация: радиус капли и давление внутри нее

Анализируя характер конденсации влажного воздуха в облаках атмосферы Земли и в туманах, можно предположить, что процесс конденсации протекает в две

стадии: первая стадия, происходящая за время τ_1 , сопровождается образованием капель одинакового размера, расположенных равномерно в объеме конденсации. Образовавшиеся капли взаимодействуют с окружающим воздухом и между собой, что приводит к установлению ФР капель по размерам за время τ_2 , что хорошо наблюдается во множестве экспериментов. Это время τ_2 превосходит время τ_1 , и в данной части работы рассматривается именно первая стадия.

Под гомогенной конденсацией будем понимать процесс внутри большого объема влажного воздуха, в результате которого образуются капли одинакового размера. Считается, что гомогенная конденсация происходит в газовой смеси, содержащей пар, когда в ней в результате флуктуаций образуются комплексы (кластеры [17]) — скопления молекул. Более детально процесс гомогенной конденсации следует описывать в рамках кинетической теории образования кластеров из молекул воды. В этом подходе необходимо учитывать, как из отдельных молекул воды образуется растущий кластер, содержащий n молекул, с учетом того, что за счет взаимодействия кластера с окружающим воздухом может происходить его разрушение. В пересыщенном паре некоторые такие скопления могут достигать критического размера, и тогда они становятся зародышами, которые далее растут до капель жидкости [18]. Эти процессы происходят на самой ранней стадии образования капли воды, поэтому в дальнейшем мы сначала пренебрежем анализом первоначальной стадии роста кластеров воды, а ограничимся конечным устойчивым состоянием, когда образовались капли одинакового радиуса. Существует большое число работ [19–22], посвященных образованию различного рода кластеров, которые содержат незначительное число частиц. В работах коллектива Ф.М. Куни с соавторами [23,24] рассматриваются различные аспекты конденсации (гомогенной и гетерогенной) пересыщенного пара в объеме, в том числе релаксация к стационарному процессу, рост капель до некоторых критических размеров в случае, когда источник пара имеет постоянную мощность, а также влияние на конденсацию вида центров зародышеобразования, наличия поверхностно-активных веществ и др. Целью же настоящей работы является анализ капель, которые содержат уже значительно большее число частиц, чем различного рода кластеры в известных авторам работах [19–22]. Таким образом, ограничимся конечным результатом образования капли радиуса r_d , не рассматривая процессы, происходящие в ходе ее роста от некоторого ее флуктуационного размера r_{00} до размера r_d .

Рассмотрим случай, когда температура влажного воздуха понизилась до некоторого значения, приводящего к полной конденсации водяных паров. Основная задача данной части работы состоит в определении радиуса образующихся капель, их числа в единице объема, параметров жидкости (давление и плотность) внутри капли и характерного времени процесса гомогенной конденсации паров воды в воздухе.

Начнем с основополагающей картины, связанной с использованием известного уравнения Лапласа для скачка давления на границе фаз:

$$\Delta p = \frac{2\sigma}{r}, \quad (6)$$

где Δp — разница давлений в сконденсированной капле и в окружающем влажном воздухе, [Pa]; σ — коэффициент поверхностного натяжения, [N/m].

Из уравнения (6) видно, что в изотермической среде при известном давлении в окружающей среде давление и плотность в капле жидкости зависят от ее радиуса. Чем меньше радиус при постоянных условиях, тем больше внутреннее давление. А отсюда из реального уравнения состояния жидкости получается и разная плотность, что обычно не учитывается в публикациях по данной тематике.

Будем считать, что в результате гомогенной конденсации из влажного воздуха образовались капли одинакового размера r_d .

К сожалению, напрямую уравнением (6) воспользоваться невозможно, потому что неизвестны радиус капли и давление внутри нее.

В настоящей работе имеем дело с влажным воздухом, влажность которого меньше единицы и равна S_1 (отношению парциального давления водяного пара при данной температуре к давлению насыщения). Пусть произошло изменение температуры от T_1 к T_2 ($T_2 < T_1$). Рассмотрим процесс образования жидких капель в объеме. Могут существовать разные процессы, но мы остановимся на одном, когда водяной пар, содержащийся в воздухе при температуре T_1 , полностью или частично сконденсировался в каплю жидкости при температуре T_2 . Необходимо определить радиус капли и параметры жидкости внутри нее. В результате конденсации жидкость из некоторого объема радиуса r_M собирается в каплю и может находиться на изотерме T_2 (рис. 2) при давлениях, больших, чем давление насыщения при T_2 . Считается, что вся имеющаяся влага перешла в жидкость в ходе конденсации (когда остаточная влажность S_L удовлетворяет неравенству $S_L/S \ll 1$). Оценим размеры области r_M , из которой вода собралась в единичную каплю. Поскольку масса жидкости, заключенная в капле, равна массе водяных паров, находящихся в объеме радиуса r_M , то можно записать следующее равенство:

$$\frac{4}{3}\pi r_d^3 \rho_d = \frac{4}{3}\pi r_M^3 \rho_V,$$

где ρ_d — плотность жидкости в капле, ρ_V — плотность пара в некоторой области.

Таким образом, связь между размерами капли и области влажного воздуха, из которой вся влага собралась в каплю за счет диффузии, следующая:

$$\frac{r_d}{r_M} = \left(\frac{\rho_V}{\rho_d} \right)^{1/3}.$$

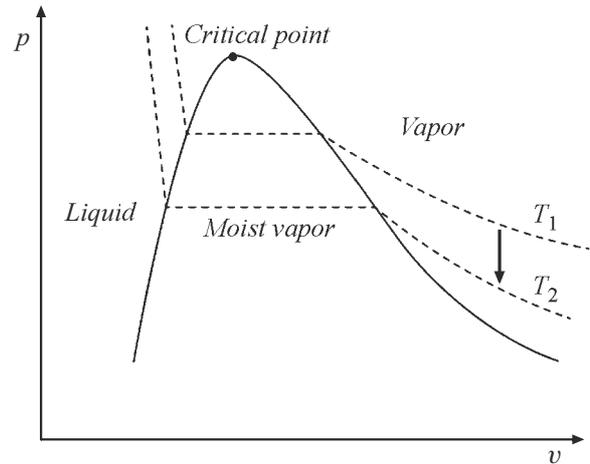


Рис. 2. Фазовая диаграмма для воды в координатах давление–удельный объем.

Однако приведенные рассуждения по-прежнему не позволяют воспользоваться напрямую уравнением (6), поскольку появилась новая величина — характерный размер области, с которой влага конденсируется (собирается) в каплю. Для окончательного решения необходимо учесть время, за которое происходит конденсация паров из области r_M в каплю окончательного радиуса r_d , и то, что при конденсации выделяется теплота, которая должна быть отведена, т.е. имеется два характерных времени: время движения волны конденсации и время сброса теплоты конденсации из области r_M во вне. Поэтому для дальнейших рассуждений предположим, что время движения фронта волны конденсационного фазового перехода равно времени отвода теплоты конденсации.

Можно определить время движения фронта волны конденсации τ_c , решая одномерную задачу Стефана. Это время, за которое граница раздела фаз пройдет расстояние от r_M до r_d . Тогда, учитывая, что радиус области влажного воздуха много больше радиуса капли воды, получаем

$$\tau_c = \frac{r_M^2}{a_V}. \quad (7)$$

Здесь a_V — коэффициент температуропроводности влажного воздуха, который складывается из температуропроводности сухого воздуха и паров воды.

При конденсации происходит выделение теплоты, поэтому, для того чтобы образующаяся капля находилась при температуре T_2 , это тепло должно быть отведено за некоторое характерное время τ_{qc} :

$$Q_c = h_{LG} \frac{1}{\tau_{qc}} \frac{4}{3}\pi r_M^3 \rho_V.$$

Здесь h_{LG} — теплота фазового перехода.

Оценим время, за которое теплота конденсации $Q = q_c S_M = q_c 4\pi r_M^2$ отводится из области радиусом r_M .

Плотность потока теплоты конденсации можно представить через коэффициент теплоотдачи конденсации α и разность температур исходного воздуха и охлажденного: $q_c = \alpha(T_1 - T_2)$.

Поскольку рассматривается конденсация в объеме, данные о коэффициенте теплоотдачи в литературе практически отсутствуют.

По оценке [25] коэффициент теплоотдачи при капельной конденсации может составлять 40–100 kW/(m²·K).

В [26] приводится эмпирическая формула для коэффициента теплоотдачи

$$\alpha = T_s^{0.8}(5 + 0.3\Delta T), \quad (8)$$

где T_s — температура насыщения, равная T_2 ; $\Delta T = T_1 - T_2$.

Следует заметить, что формула (8) справедлива для чистого водяного пара. В настоящей задаче средой является смесь сухого воздуха и водяного пара, поэтому получаемые значения коэффициента теплоотдачи будут несколько завышены. Для учета отличия состава среды нужно вводить поправочный коэффициент, по абсолютной величине, меньший единицы, который здесь не используется.

В результате выражение для времени охлаждения можно записать в виде

$$\tau_{qc} = h_{LG} \frac{r_M \rho_V}{3\alpha \Delta T}. \quad (9)$$

Следует иметь в виду, что на отвод теплоты конденсации может влиять и излучение, однако этому будет посвящен отдельный анализ.

Для получения окончательных результатов используется вышеуказанное предположение о том, что в процессе гомогенной конденсации времена (7) и (9) равны: $\tau_c = \tau_{qc}$.

Используя реальное уравнение состояния [27], находим радиус капли, давление и плотность в капле жидкости при температуре T_2 .

Нахождение перечисленных параметров выполняется методом итераций:

$$P_d^{(i+1)} = P_a + \frac{2\sigma}{r_M} \left[\left(\frac{\rho_V}{\rho_d} \right)^{-\frac{1}{3}} \right]^{(i)},$$

где P_a — давление окружающего воздуха, P_d — давление в капле воды.

Более детально расчет с использованием уравнения состояния воды [27] выполнен в работе [28]. В расчетах также использовалось реальное уравнение состояния $P_d = P_s + a_0^2(\rho_d - \rho_s)$, где P_s , ρ_s — давление и плотность на линии насыщения; a_0 — скорость звука в воде. В результате для воздуха на высоте 1000 м при определенной температуре получены значения радиуса, плотности воды и давления внутри капли (см. таблицу, рис. 3).

Полученные значения радиуса лежат в пределах наблюдаемых значений размеров капель [2,3,9,29].

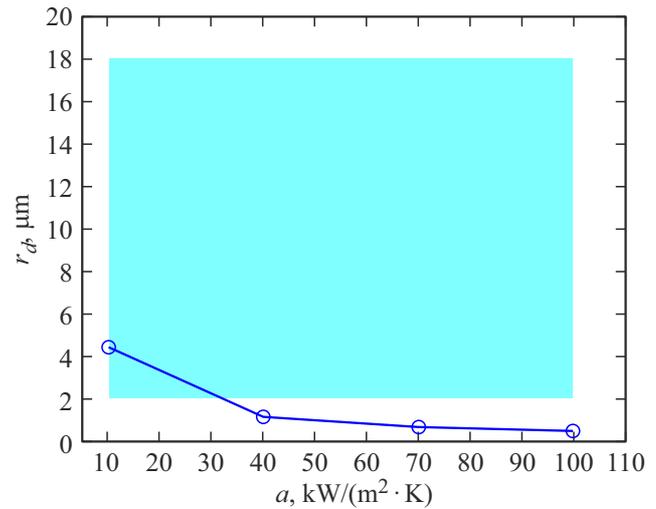


Рис. 3. Зависимость радиуса капли от коэффициента теплоотдачи капельной конденсации и диапазон преобладающих размеров капель в облаках и туманах (сплошная область).

В результате, зная первоначальную влажность воздуха при известной температуре, можно оценить радиус капли, а следовательно, и первоначальное число капель в единице объема, что понадобится далее при обсуждении распределения капель по размерам. Также можно рассчитать время процесса гомогенной конденсации, что очень важно для оценки первоначального образования капель.

2. Влияние электрических полей на гомогенную конденсацию в атмосфере

При конденсации водяных паров на заряженных частицах может быть по крайней мере два крайних случая: когда заряд расположен на поверхности достаточно крупной твердой частицы и тогда сконденсировавшаяся жидкость находится в виде некоторого слоя, толщина которого может быть меньше радиуса частицы. Другой случай, когда заряд сосредоточен на твердой частице очень малого радиуса (примерно 10^{-8} м), который во много раз меньше, чем радиус жидкой капли, образовавшейся при гомогенной конденсации. Далее сосредоточимся на втором случае.

Рассмотрим влияние электрических полей на процесс конденсации. Можно выделить несколько механизмов такого влияния. Первый — это влияние статических электрических полей, создаваемых заряженными частицами, второй — электрическими полями от внешних объектов, например, от заряженных облаков и земли и третий — влияние переменных электрических полей.

Рассмотрим более детально результаты гомогенной конденсации, когда она происходит на первоначальной частице радиуса r_{00} , несущей электрический заряд eZ

Рассчитанные данные для капли жидкости и радиус области влажного воздуха, из которой конденсируется вода

$\alpha, \text{kW}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$	Давление внутри капли P_d, MPa	$\rho_d, \text{kg}/\text{m}^3$	$r_d, \mu\text{m}$	$r_M, \mu\text{m}$
10.27	0.1206	999.95	4.4	248.6
40	0.219	1000	1.13	63.8
70	0.318	1000	0.64	36.5
100	0.418	1000.1	0.45	25.5

(это может быть заряженная пылинка). По-прежнему, не рассматривая процессы, проходящие за время конденсации и приводящие к образованию жидкой частицы радиуса $r_d \gg r_{00}$, ограничимся конечным состоянием, сравнивая его с конечным состоянием в отсутствие заряда.

В атмосфере на разных высотах, начиная от поверхности Земли и до десятков километров, существуют различные заряженные частицы, на которых происходит конденсация паров воды. Некоторые из этих частиц возникают за счет космических лучей, производящих ионизацию различного рода твердых и газообразных включений. Это могут быть отдельные молекулы, кластеры, состоящие из групп молекул различного или одинакового сорта или твердые пылевые частицы. Кроме того, зарядка может происходить за счет того, что твердые частицы, имеющие различного рода металлические включения, подвергаются солнечной радиации. Под действием солнечного излучения имеет место фотоэмиссия: свободные электроны уходят в окружающее пространство, частицы приобретают положительный заряд. В свою очередь электроны могут „прилипнуть“ к различным атомам (например, к кислороду), которые имеют большое сродство к электрону. Так, заряженные частицы могут присутствовать в большом количестве в атмосфере. Перечень частиц, механизмов образования зарядов на них и поддержания их в атмосфере представляет собой отдельную тематику [2,30–33]. Поэтому в настоящей работе предполагается наличие частиц, заряженных как положительно, так и отрицательно. Здесь основное внимание уделяется давлению, которое создается электрическим полем заряженного центра.

Рассмотрим задачу с условием, что в водяном паре присутствуют центры конденсации малого радиуса r_{00} , несущие заряд $Q = eZ$ (e — заряд электрона, Z — количество зарядов). Радиус частицы должен быть порядка $0.1–0.01 \mu\text{m}$. При этом она не может скапливать на себе слишком большое количество зарядов Z . Так как заряды имеют один знак, между ними возникают силы отталкивания, приводящие к разрыву частицы, на которой они накопились.

Заряженный центр создает вокруг себя радиальное электрическое поле. Пусть на этом центре уже образовалась капля с радиусом r_d .

Радиальная часть вектора индукции электрического поля остается постоянной при переходе через границу сред, поэтому справедливы следующие соотношения:

$$D_d(r_d) = D_a(r_d),$$

$$E_d \epsilon_0 \epsilon_d = E_a \epsilon_0 \epsilon_a.$$

Тогда на границе капли напряженность электрического поля изменяется скачком

$$E_a = \frac{eZ}{4\pi\epsilon_0\epsilon_a r_d^2},$$

$$E_d = \frac{eZ}{4\pi\epsilon_0\epsilon_d r_d^2}, \tag{10}$$

где ϵ_0 — электрическая постоянная; ϵ_d, ϵ_a — относительные диэлектрические проницаемости воды и воздуха.

Электрическое поле создает давление, которое вносит вклад в лапласовский скачок на поверхности капли и влияет на него. Так как электрическое давление связано с напряженностью электрического поля как $P_j = \epsilon_0 \epsilon_j E^2 / 2$ ($j = d, a$), то, согласно (10), давление пропорционально квадрату напряженности, а следовательно, и квадрату электрического заряда центра конденсации. Выражения для электрического давления в воздухе и внутри капли:

$$P_{dE} = \frac{(eZ)^2}{32\pi^2\epsilon_0\epsilon_d r_d^4},$$

$$P_{aE} = \frac{(eZ)^2}{32\pi^2\epsilon_0\epsilon_a r_d^4}.$$

Как и упоминалось выше, давление, создаваемое электрическим полем, не зависит от знака заряда, который несет центр конденсации.

Наличие электрического поля приводит к видоизменению лапласовского скачка. Условие равновесия на поверхности капли с учетом электрического поля имеет вид

$$\Delta P_{hd} - \Delta P_E = \frac{2\sigma}{r_{de}},$$

где ΔP_{hd} — разность давлений в капле и в окружающей атмосфере; $\Delta P_E = P_{aE} - P_{dE}$ — разность электрических давлений: окружающего воздуха и внутри капли; r_{dE} —

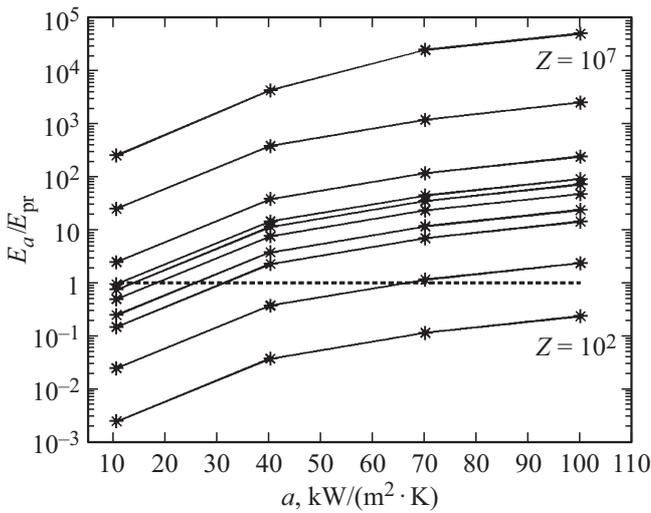


Рис. 4. Относительная напряженность электрического поля, возникающая в атмосферном воздухе при различных коэффициентах теплоотдачи капельной конденсации и числах зарядов на центре конденсации; отнесение к пробойной напряженности.

радиус капли, образующейся при конденсации в присутствии электрического поля, созданного заряженным центром конденсации.

Далее оценим влияние электрического поля на радиус образующейся капли.

В качестве варьируемого параметра выбрано количество зарядов Z , которые могут скопиться на центре конденсации. Предварительная оценка показала, что необходимо $Z \sim 10^4$, чтобы влияние разности электрических давлений было заметным.

Для расчетов выбрано, что относительная диэлектрическая проницаемость воды внутри капли равна $\varepsilon_d = 80$, окружающего воздуха $\varepsilon_a = 1$.

Анализ выполняется при рассмотрении зависимости параметров от числа зарядов Z и коэффициента теплоотдачи при конденсации α .

Сначала рассчитаем электрические поля, возникающие снаружи и внутри капли. Вследствие большого различия диэлектрических проницаемостей сред внешнее поле превышает внутреннее на два порядка. На рис. 4 отображены значения напряженности внешнего электрического поля, как более существенного по отношению к пробойному ($E_{pr} = 3 \text{ MV/m}$). Зависимость построена для четырех полученных значений коэффициента теплоотдачи (см. таблицу). Горизонтальная линия соответствует пробойному напряжению в атмосфере при данном давлении. Отмечены изолинии с одинаковым значением Z . При больших Z электрическое поле должно значительно превышать пробойное, что не реализуется в атмосфере.

На рис. 5 показано, как изменяется при росте количества зарядов разность электрических давлений по отношению к гидродинамическому лапласовскому скачку.

На рис. 6, 7 показаны изменения давления в капле и радиуса капли.

Вычисление радиусов капли жидкости выполняется аналогично схеме в предыдущем разделе при отсутствии электрического поля. Теперь итерационная формула расчета дополняется разницей электрических давлений. В результате, используя уже полученные значения радиуса области влажного воздуха, из которой конденсируется капля, и те же оценки коэффициента теплообмена при капельной конденсации, после нескольких итераций получаем значения радиусов капель жидкости в зависимости от числа зарядов на частице. Получены изменения радиуса капли и давления в ней.

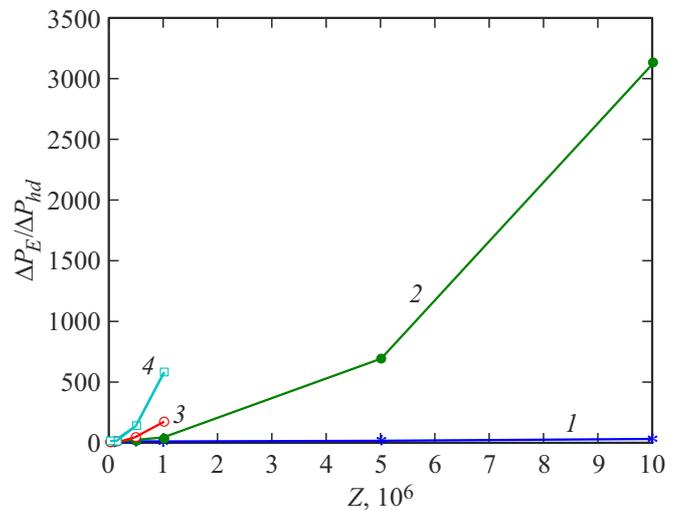


Рис. 5. Относительное электрическое давление при различных коэффициентах теплоотдачи при конденсации и числе заряда на центре конденсации: 1 — $\alpha = 10.27$, 2 — 40, 3 — 70, 4 — $100 \text{ kW}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$.

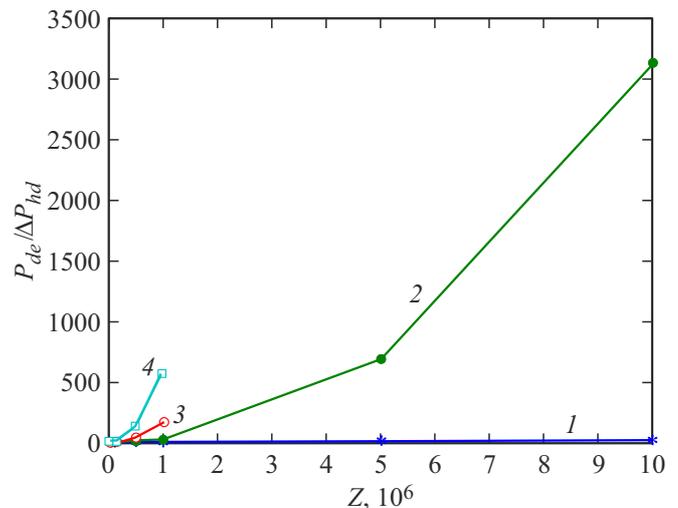


Рис. 6. Относительное давление в капле жидкости при различных коэффициентах теплоотдачи при конденсации и числе заряда на центре конденсации: 1 — $\alpha = 10.27$, 2 — 40, 3 — 70, 4 — $100 \text{ kW}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$.

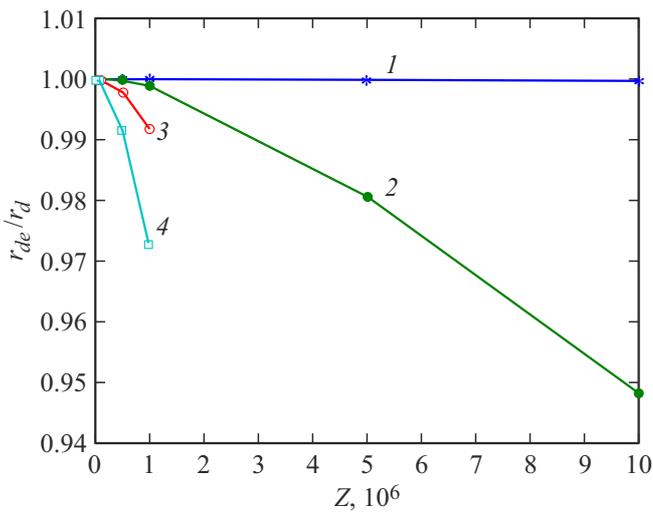


Рис. 7. Относительный радиус капли жидкости при различных коэффициентах теплоотдачи при конденсации и числах заряда на центре конденсации: 1 — $\alpha = 10.27$, 2 — 40, 3 — 70, 4 — $100 \text{ kW}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$.

Результаты проведенных расчетов показывают, что радиус капли при гомогенной конденсации на заряженных частицах зависит практически от двух параметров: от числа зарядов и от коэффициента теплообмена. Однако существенное влияние заряда при одних и тех же коэффициентах теплоотдачи происходит при $Z > 10^4$.

Из проведенных расчетов следует, что для величины заряда от нуля до порядка $1.6 \cdot 10^{-16} \text{ C}$ радиус капли практически не меняется, но растет давление жидкости внутри капли. Рассмотрение зарядов большего значения не имеет практического смысла из-за того, что, как отмечалось ранее, это может приводить к развитию электрического пробоя воздуха.

При изменении электрического поля от нуля до определенных значений наличие заряда приводит к росту электрического давления, поэтому из условия лапласовского скачка давление жидкости внутри капли должно возрастать, что и наблюдается в расчетах.

Также из результатов расчетов следует, что знак заряда не влияет на условия конденсации. Однако в данном рассмотрении при расчете r_M области, из которой влага, содержащаяся в воздухе, собирается в каплю не учитывалось влияние электрического поля на диффузию. Если учесть, что молекулы воды обладают дипольным моментом $d = 61 \cdot 10^{-29} \text{ C/m}$, то наличие электрического поля от заряженной частицы влияет на движение молекул к центру конденсации. На молекулу в электрическом поле действует сила, которая равна $\mathbf{F} = d\nabla E$. Поэтому для отрицательно заряженного центра конденсации эта сила приводит к отталкиванию от центра конденсации, а для положительно заряженного — к притягиванию к центру конденсации. В некоторых случаях действительно может наблюдаться влияние знака заряда на процесс гомогенной конденсации [34]. Учет этого обстоятельства

может привести к изменению значения радиуса r_M , поскольку наряду с диффузионной составляющей будет влиять и конвективная. В настоящем рассмотрении это влияние не учитывается, поэтому результат: характеристики гомогенной конденсации не зависят от знака заряда. Более детальный анализ этого процесса авторы оставляют на будущее.

Влияние α в рамках предложенной модели равновесного образования капли связано с равенством времен волны конденсации и сброса тепла, зависящего от коэффициента теплообмена.

Рассмотренные в данном разделе процессы конденсации на заряженных частицах могут иметь отношение к анализу устойчивости границы заряженного облака, исследованной в работе [35].

Имеются работы, в которых исследуется влияние электрических полей на смещение фазового равновесия капель, находящихся в электрическом поле. Однако и эти воздействия могут происходить при электрических полях, существенно больших, чем поле электрического пробоя, и поэтому здесь не рассмотрены. Более интересным является анализ влияния переменных электрических полей на параметры капли, что требует дальнейшего более подробного анализа.

Заключение

Рассмотрены гомогенная конденсация паров воды влажного воздуха, происходящая на электрически нейтральных центрах, и гомогенная конденсация на заряженных центрах. Расчет параметров (радиус, плотность и давление) образовавшейся капли конденсата основан на гипотезе о равенстве времени отвода теплоты фазового перехода и времени движения волны конденсации водяного пара. Проведены расчеты значений давления и плотности внутри капли воды в объеме влажного воздуха на высоте 1000 м. Предложенный механизм гомогенной конденсации может применяться и на других высотах, и в частности, может оказаться полезным для прогнозирования образования туманов вблизи поверхности земли и различных объектов.

Исследовано влияние заряда, когда гомогенная конденсация происходит на частицах, несущих электрический заряд. Показаны границы влияния электрического поля на параметры гомогенной конденсации. Установлено, что радиус капли уменьшается в зависимости от заряда частицы, а давление внутри капли увеличивается с ростом числа зарядов и вне зависимости от знака заряда.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] И.П. Мазин, В.М. Меркулович. В кн.: *Вопросы физики облаков*. Сб. ст. памяти С.М. Шметера (Центр. аэролог. обсерватория, М., 2008), с. 217.
- [2] Л.Т. Матвеев. *Курс общей метеорологии. Физика атмосферы* (Гидрометеиздат, Л., 1984)
- [3] Л.Г. Качурин. *Физические основы воздействия на атмосферные процессы* (Гидрометеиздат, Л., 1990)
- [4] Я.Б. Зельдович. *ЖЭТФ*, **13** (11/12), 525 (1942).
- [5] Л.Е. Стернин. *Основы газодинамики двухфазных течений в соплах* (Машиностроение, М., 1974)
- [6] T.E.W. Schumann. *Q.J.R. Meteorol. Soc.*, **66** (285), 195 (1940). DOI: 10.1002/qj.49706628508
- [7] Н.М. Корценштейн, Е.В. Самуйлов, А.К. Ястребов. *Коллоид. журн.*, **69** (4), 488 (2007). [N.M. Kortsenshtein, E.V. Samuilov, A.K. Yastrebov. *Colloid J.*, **69** (4), 450 (2007). DOI: 10.1134/S1061933X07040060]
- [8] М.Л. Смолуховский. В сб.: *Коагуляция коллоидов*, под ред. А.И. Рабиновича, П.С. Васильева (ОНТИ, М.–Л., 1936), с. 20.
- [9] H.G. Houghton, W.H. Radford. In: *Papers in Physical Oceanography and Meteorology* (Massachusetts, Cambridge and Woods Hole: MIT, Woods Hole Oceanographic Institution, 1938), v. VI, № 4.
- [10] Р.А. Ткаленко. *Изв. АН СССР, МЖГ*, (5), 73 (1970).
- [11] В.П. Баханов. Труды „УкрНИГМИ“, (Гидрометеиздат, М., 1972), № 118, с. 46.
- [12] P.G. Hill. *J. Fluid Mech.*, **25** (3), 593 (1966). DOI: 10.1017/S0022112066000284
- [13] Н.М. Корценштейн, Е.В. Самуйлов, А.К. Ястребов. *ТВТ*, **47** (1), 89 (2009). [N.M. Kortsenshtein, E.V. Samuilov, A.K. Yastrebov. *High Temp.*, **47** (1), 83 (2009). DOI: 10.1134/S0018151X09010118]
- [14] Л.В. Петров, Н.М. Корценштейн. В сб.: *Избр. докл. VI Междунар. научно-техн. конф. „Проблемы химмотологии: от эксперимента к математическим моделям высокого уровня“* (ИД „Граница“, М., 2016), с. 97.
- [15] Н.М. Корценштейн, Л.В. Петров. *Коллоид. журн.*, **79** (3), 276 (2017). DOI: 10.7868/S0023291217030065 [N.M. Kortsenshteyn, L.V. Petrov. *Colloid J.*, **79** (3), 333 (2017). DOI: 10.1134/S1061933X17030061]
- [16] Е.В. Самуйлов. *Изв. РАН. Энергетика*, (5), 125 (2009).
- [17] Б.М. Смирнов. *Физика фрактальных кластеров* (Наука, Глав. ред. физ.-мат. лит-ры, М., 1991)
- [18] А.Г. Амелин. *Теоретические основы образования тумана при конденсации пара* (Химия, М., 1972)
- [19] Б.В. Егоров, Ю.Б. Маркачев, Е.А. Плеханов. *Хим. физика*, **25** (4), 61 (2006).
- [20] M.S. Alam, J.H. Jeong. *J. Mol. Liq.*, **261**, 492 (2018). DOI: 10.1016/j.molliq.2018.04.022
- [21] Г.Ф. Крымский, С.И. Петухов, Г.С. Павлов. *Оптика атмосферы и океана*, **30** (4), 281 (2017).
- [22] D. Kashchiev. *Nucleation. Basic Theory with Applications* (Butterworth–Heinemann, 2003)
- [23] А.П. Гринин, Ф.М. Куни, А.К. Щекин, *ТМФ*, **52** (1), 127 (1982). [A.P. Grinin, F.M. Kuni, A.K. Shchekin, *Theoret. Math. Phys.*, **52** (1), 699 (1982). DOI: 10.1007/BF01027791]
- [24] Ф.М. Куни, А.К. Щекин, А.П. Гринин. *УФН*, **171** (4), 345 (2001). DOI: 10.3367/UFN.0171.200104a.0345 [F.M. Kuni, A.K. Shchekin, A.P. Grinin. *Phys. Usp.*, **44** (4), 331 (2001). DOI: 10.1070/PU2001v044n04ABEH000783]
- [25] Б.Н. Юдаев. *Теплопередача*, учеб. для вузов (Выш. школа, М., 1973)
- [26] В.В. Ягов. *Теплообмен в однофазных средах и при фазовых превращениях: учебное пособие для вузов* (Издат. дом МЭИ, М., 2014)
- [27] W. Wagner, A. Pruss. *J. Phys. Chem. Ref. Data*, **31** (2), 387 (2002). DOI: 10.1063/1.1461829
- [28] Е.Ю. Скотаренко. Магистр. дисс. (МЭИ, М., 2023)
- [29] H.R. Pruppacher, J.D. Klett. *Microphysics of Clouds and Precipitation* (Springer, 2010)
- [30] И.М. Имянитов, Е.В. Чубарина. *Электричество свободной атмосферы: Результаты измерений во время МГТ и МГС* (Гидрометеиздат, Л., 1965)
- [31] Л.П. Бабич, Е.И. Бочков, И.М. Куцык. *Геоматнетизм и аэронавигация*, **47** (5), 709 (2007). [L.P. Babich, E.I. Bochkov, I.M. Kutsyk. *Geomagnetism and Aeronomy*, **47** (5), 671 (2007). DOI: 10.1134/S0016793207050167]
- [32] *Получены доказательства реализации пробоя на убегающих электронах в грозовой атмосфере* Электронный ресурс. Режим доступа: <http://www.fian-inform.ru/novosti-nauki/item/276-polucheny-dokazatelstv>
- [33] И.М. Маторы, И.А. Семенова, Н.Г. Шакун, П.Т. Шишляников. <https://textarchive.ru/c-1138891-p9.html>
- [34] C.-C. Chen, H.-C. Cheng. *J. Chem. Phys.*, **126**, 034701 (2007). DOI: 10.1063/1.2424707
- [35] О.А. Синкевич. *ТВТ*, **54** (6), 827 (2016). DOI: 10.7868/S004036441606020X [O.A. Sinkevich. *High Temp.*, **54** (6), 775 (2016). DOI: 10.1134/S0018151X16060201]