

ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЗАРЯДА НА ПРОЦЕССЫ ИСПАРЕНИЯ И КОНДЕНСАЦИИ В ОБЛАКАХ. ДИСПЕРСИОННЫЙ АНАЛИЗ.

Икром Меражов.

Phd. Международный университет Азия, Бухара, Узбекистан.

Аннотация: В данной работе рассматривается влияние объемного электрического заряда на динамику испарения и конденсации в облачных системах. Проведен линеаризованный анализ уравнений движения, уравнения неразрывности и уравнения фазовых переходов с учетом электрического поля. Получено дисперсионное соотношение, описывающее распространение малых возмущений в системе, включающей гидродинамические, термодинамические и электродинамические эффекты. Выявлены условия устойчивости волновых решений и влияние заряда на динамику осадкообразования. Эта статья включает новые предположения и упрощения, нацеленные на улучшение предложенной математической модели динамики облаков и фазовых переходов развитых в работах [6-10], это может привести к значительному улучшению прогнозирования погоды и понимания процессов в атмосфере. Важно отметить использование искусственного интеллекта для корректировки математических моделей — это может значительно повысить точность и эффективность моделей. Как обычно система уравнений записано в матричном виде и линеаризованы эти уравнения относительно постоянного решения. Далее решая пошагово каждое уравнение друг за другом, найдены общие решения для каждого уравнения. Дальнейшей целью нашего исследования этой математической модели является найти зависимость давления и температуры от скоростей испарения и конденсации среды методами обратных задач математической физики.

Общие принципы построения рассматриваемой новой математической модели.

Предложенная нами очень упрощенная и удобная для исследования математическая модель облака и фазовых переходов в атмосфере в вертикальном направлении позволяет найти общий волновой вид решений в одномерном случае, а также посмотреть как влияют факторы как скорости испарения и конденсации на температуру и давление. Эта математическая модель было получена исходя из общих требований ко всем моделям сплошных сред таких как законы сохранения массы, импульса, энергии, первого и второго начала термодинамики, а также из принципа непротиворечивости и замкнутости уравнений модели. Эти принципы построения математических моделей являются очень известны. Они предложены и развиты в работах выдающихся учёных таких как С.К. Годунова, В.Н. Доровского, А.М. Блохина и других известных их последователей [1-5]

1. Введение . Вопросы взаимодействия электрического заряда с процессами фазовых переходов в атмосфере играют важную роль в понимании формирования осадков, электризации облаков и климатических изменений. В данной работе проводится анализ влияния электрического поля на испарение и конденсацию в условиях атмосферной динамики.

2. Математическая модель. Рассматривается одномерная модель вертикального движения газа с учетом заряда. Добавление объемного заряда в модель облаков потребует учета влияния электромагнитных сил на движение частиц. Для этого в уравнении

движения необходимо включить максвеллов тензор напряжений P_{ik} , который описывает электромагнитный вклад в баланс импульса.

Обновленное векторное уравнение движения

где: \mathbf{u} — вектор скорости, \mathbf{p} — тензор плотности потока импульса, P_{ik} — максвелловский тензор напряжений, ρ_e — объемная плотность заряда, E — напряженность электрического поля, pg — сила тяжести. Максвелловский тензор напряжений определяются как:

Этот тензор учитывает как нормальные (давление электрического поля), так и касательные напряжения (градиенты электрического поля).

Внесение поправок в уравнение волнового типа при линеаризации системы уравнений, максвелловский тензор P_{ik} вносит дополнительные члены, связанные с взаимодействием ρ_e заряженных капель воды с электрическим полем. В частности, появится дополнительная ρ_e зависимость скорости и давления от электрического поля E , что приведет к модификации волнового уравнения.

$$\frac{\partial \rho_e}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_e \mathbf{u}) = S_q.$$

Для учета динамики объемного заряда и его распределения в облаке необходимо ввести уравнение для заряда q (удельного заряда капель, $q = \frac{\rho_e}{\rho}$ т.е. заряда

$$\frac{\partial q}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla q = -\frac{q}{\tau_q} + S'_q,$$

на τ_q единицу массы), а также уравнение для S'_q плотности свободного заряда.

Уравнение для объемного заряда (обобщенное уравнение Максвелла)

Здесь S_q — источник заряда, включающий: - генерацию заряда при столкновениях капель, - ионизацию или рекомбинацию зарядов, - влияние электростатической индукции.

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = 4\pi \rho_e.$$

Уравнение для удельного заряда капель q . Определим удельный заряд как:

$$\mathbf{F} = q\mathbf{E} + \frac{q}{c}(\mathbf{u} \times \mathbf{B}).$$

$$\rho = \rho_0, \quad p = p_0, \quad \mathbf{u} = 0, \quad \rho_e = \rho_{e0}, \quad q = q_0, \quad \mathbf{E} = \mathbf{E}_0.$$

Тогда его динамика описывается :

где: τ_q — характерное время релаксации заряда, S'_q — источник заряда на единицу массы.

Полевая связь: уравнение Пуассона для электрического поля. Так как заряд создает электрическое поле, добавляем уравнение Пуассона:

Дополнительно: - Можно добавить уравнения для заряженных капель, учитывающие их движение под действием силы Лоренца - Если капли участвуют в процессе испарения и конденсации, q может изменяться из-за перераспределения заряда.

$$\frac{\partial \rho \mathbf{u}}{\partial t} + \text{div} \tilde{\mathbf{\Pi}} = \rho \mathbf{g} + \rho_e \mathbf{E},$$

Пусть имеется стационарное однородное состояние: $\tilde{\mathbf{\Pi}} = \rho u_i u_k + p \delta_{ik} - P_{ik}$

$$\frac{\partial \hat{\rho}_e}{\partial t} + \rho_{e0} \nabla \cdot \hat{\mathbf{u}} = 0.$$

$$\frac{\partial \hat{q}}{\partial t} + \mathbf{u}_0 \cdot \nabla \hat{q} = -\frac{\hat{q}}{\tau_q}.$$

$$\mathbf{u}_0 = 0,$$

$$\nabla \cdot \hat{\mathbf{E}} = 4\pi \hat{\rho}_e.$$

Малые возмущения (линеаризуемые переменные):

$$\hat{P}_{ik} = \frac{1}{4\pi} (E_{0i} \hat{E}_k + E_{0k} \hat{E}_i - |\mathbf{E}_0|^2 \delta_{ik}) \quad \hat{\rho}.$$

$$\frac{\partial^2 \hat{\rho}}{\partial t^2} - c_s^2 \nabla^2 \hat{\rho} + \frac{\rho_{e0}}{\rho_0} \nabla \cdot \hat{\mathbf{E}} = 0.$$

$$\frac{\partial^2 \hat{\rho}}{\partial t^2} - c_s^2 \nabla^2 \hat{\rho} + \frac{4\pi \rho_{e0}^2}{\rho_0} \hat{\rho} = 0.$$

Подставим в $\hat{\rho} \sim e^{i(\mathbf{k}\cdot\mathbf{r}-\omega t)}$ уравнения и откинем нелинейные члены.

$$\omega^2 = c_s^2 k^2 + \frac{4\pi \rho_{e0}^2}{\rho_0}.$$

Линеаризация уравнения движения

Так как \mathbf{g} влияет на вертикальные волны, рассмотрим добавляющий дополнительную связь.

Линеаризация максвелловского тензора:

Линеаризация уравнения для заряда

Уравнение для удельного заряда:

Но так как остается простое экспоненциальное затухание.

Линеаризация уравнения Пуассона

Это вносит дополнительную связь между возмущениями заряда и электрического поля.

Получение волнового уравнения . Используем уравнения движения, неразрывности и

$$\hat{\rho}, \hat{p}, \hat{\mathbf{u}}, \hat{\rho}_e, \hat{q}, \hat{\mathbf{E}}.$$

заряда для получения волнового уравнения для давления или плотности

После подстановки:

$$\frac{\partial \hat{\rho} \mathbf{u}}{\partial t} + \nabla \cdot (\hat{p} \mathbf{I} - \hat{P}) = \rho_0 \mathbf{g} + \hat{\rho}_e \mathbf{E}_0 + \rho_{e0} \hat{\mathbf{E}}.$$

Подставляем уравнение Пуассона:

$$\hat{E}_z,$$

Рассматривая находим дисперсионное соотношение:

$$\omega^2 = c_s^2 k^2 - \frac{4\pi |\rho_{e0}|^2}{\rho_0}$$

Анализ влияния заряда на фазовую скорость: фазовая скорость модифицируется ω^2 если фазовая скорость увеличивается за счет электростатического влияния.

Анализ устойчивости системы с учетом объемного заряда. Рассмотрим дисперсионное уравнение:

Добавим комплексное возмущение, где отвечает за затухание или рост возмущений.

Отсюда

$$2\omega_r \gamma = 0.$$

Приравняем мнимую и вещественную части: - Вещественная:

Мнимая:

$$v_{ph} = \frac{\omega}{k} = \sqrt{c_s^2 + \frac{4\pi \rho_{e0}^2}{\rho_0 k^2}}$$

$$\rho_{e0} \neq 0$$

Поскольку имеем $\gamma = 0$. Это означает, что система ****нейтрально устойчива****: нет роста возмущений, но и нет их затухания.

$$\omega^2 = c_s^2 \gamma \cdot \frac{4\pi \rho_{e0}^2}{\rho_0}$$

Условие неустойчивости. $\omega = \omega_r + i\gamma$, Рассмотрим случай отрицательной плотности заряда ($0 < \rho_{e0}$), что может возникнуть при локальном избытке электронов.

$$(\omega_r + i\gamma)^2 = c_s^2 k^2 + \frac{4\pi \rho_{e0}^2}{\rho_0}$$

Тогда:

$$\omega_r^2 - \gamma^2 + 2i\omega_r \gamma = c_s^2 k^2 + \frac{4\pi \rho_{e0}^2}{\rho_0}$$

$$\omega_r^2 - \gamma^2 = c_s^2 k^2 + \frac{4\pi \rho_{e0}^2}{\rho_0}$$

Это приводит к мнимой то есть к экспоненциальному росту возмущений. В таком случае малые отклонения усиливаются, что может приводить к локальным электрическим

нестабильностям.

Физическая интерпретация - Если $p_{e0} > 0$ (избыток положительного заряда), система остается устойчивой. - Если $p_{e0} < 0$, возможно развитие электростатической неустойчивости, что может привести к разрядам в облаке или усилению конвекции.

Вывод : Система в целом устойчива, но при определенных условиях ($p_{e0} < 0$, малые κ) могут развиваться разряды или электрически индуцированные неустойчивости.

Литературы

1. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. — Гидродинамика (Теоретическая физика, Том 6)
2. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. — Статистическая физика. Часть 1 (Теоретическая физика, Том 5)
3. Годунов, С.К., Роменский, Е.И., Элементы механики сплошных сред и законы сохранения. Новосибирск, Научная книга, 1998
4. Блохин А. М., Доровский В. Н. Проблемы математического моделирования в теории многоскоростного континуума. СО РАН. Новосибирск.
5. Godunov S. K., Romensky E. I. Thermodynamics. Conservation Laws, and Symmetric Forms of Differential Equations in Mechanics of Continuous Media // Comput. Fluid Dynamics Review 1995, J. Willey: 1995. P. 19-30.
6. Merazhov, I. ОБ ОДНОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ОБЛАКО. <https://worldlyjournals.com/index.php/IJSR/article/view/7130>, date 25-11-2024, Vol. 8 No. 2 (2024): International journal of scientific researchers.
7. Merazhov, I. Общий подход к математическим моделям облако, <https://worldlyjournals.com/index.php/IJSR/article/view/7972>, 21-12-2024, Vol. 9 No. 1 (2024): International journal of scientific researchers. Vol. 9 No. 1 (2024): International journal of scientific researchers.
- 8.-Merazhov, I. ТЕРМОДИНАМИКА ДЛЯ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ОБЛАКО Vol. 1 No. 2 (2024): Modern digital technologies in education: problems and prospects, <https://incop.org/index.php/mod/article/view/241>
9. Merazhov, I. THE BASIC PRINCIPLES OF CONSERVATION IN ECOLOGY. PEDAGOGIK TADQIQOTLAR JURNALI №3, Yanvar, 2025, ISSN: 3060-4923, Impact Factor – 7,212 https://scholar.google.com/scholar?hl=ru&as_sdt=0%2C5&q=wosjournals.com&btnG
10. Merazhov, I. ИССЛЕДОВАНИЕ УРАВНЕНИЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ОБЛАКА В ВЕРТИКАЛЬНО ОДНОМЕРНОМ ЛИНЕАРИЗОВАННОМ СЛУЧАЕ. PEDAGOGIK TADQIQOTLAR JURNALI №4, Fevral, 2025
ISSN: 3060-4923, Impact Factor – 7,212 worldlyknowledgeIndex: google scholar, research gate, research bib, zenodo, open aire.
https://scholar.google.com/scholar?hl=ru&as_sdt=0%2C5&q=wosjournals.com&btnG
11. Boboqulova, M. X. (2025). YUQORI CHASTOTALI SIGNALLARNI UZATISH USULLARI. PEDAGOGIK TADQIQOTLAR JURNALI, 2(2), 32-35.

12. Boboqulova, M. X. (2025). TO 'LQIN O 'TKAZGICHLAR (VOLNOVODLAR). *Problems and solutions at the stage of innovative development of science, education and technology*, 2(1), 1-7.