

САМАРСКАЯ ОБЛАСТНАЯ  
ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ШКОЛА

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТЕЙ  
НЕКОТОРЫХ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ  
АТМОСФЕРЫ КЛАССИЧЕСКОЙ ПЛАНЕТЫ ОТ ВЫСОТЫ**

(научно-исследовательская работа)

**Выполнила:**

Матюнина Кристина,  
10 класс СОФМШ

---

**Научный руководитель:**

Филиппов Юрий Петрович,  
к.ф.-м.н., старший препода-  
ватель кафедры общей и  
теоретической физики  
Самарского государствен-  
ного университета

---

Самара, 2011 г.

# Оглавление

<b>Введение</b>	<b>3</b>
<b>1 Атмосферы классических планет. Приближение изотермической атмосферы</b>	<b>7</b>
1.1 Строение атмосферы Земли . . . . .	7
1.2 Строение атмосфер других планет Солнечной системы . . . . .	12
1.2.1 Атмосфера Венеры . . . . .	12
1.2.2 Атмосфера Марса . . . . .	15
1.2.3 Атмосфера Юпитера . . . . .	18
1.2.4 Атмосфера Сатурна . . . . .	20
1.3 Модель идеального газа и его основные свойства . . . . .	22
1.4 Приближение изотермической атмосферы. Распределение Больцмана . . . . .	28
<b>2 Расчет и анализ искомых величин</b>	<b>30</b>
2.1 Модель атмосферы. Обобщенное распределение Больцмана . . . . .	30
2.2 Расчет молярной массы, постоянной адиабаты и скорости звука смеси идеальных газов . . . . .	33
2.3 Расчет молярной и удельной массовой теплоемкости для смеси идеальных газов . . . . .	35
2.4 Численный анализ результатов для атмосферы Земли . . . . .	37
<b>Заключение</b>	<b>49</b>
<b>Литература</b>	<b>51</b>

# Введение

Актуальность работы. **Атмосферой** (от. греч. атмосфер – «пар» и сфера – «сфера») принято называть газовую оболочку небесного тела, удерживаемую около него гравитацией. Поскольку не существует резкой границы между атмосферой и межпланетным пространством, то обычно атмосферой принято считать область вокруг небесного тела, в которой газовая среда вращается вместе с ним как единое целое. *Стационарной атмосферой*<sup>1</sup> обладают большинство классических планет (за исключением Меркурия) и некоторые из их крупных спутников, например, Титан у Сатурна, Тритон у Нептуна. Нестационарной атмосферой обладают большинство карликовых планет, объекты промежуточного класса (в частности, кентавры) и кометы [1].

Роль атмосферы в эволюции небесного тела огромна. В частности, без этой оболочки на Земле *жизнь была бы не возможна*. Всякое живое существо всю свою жизнь на Земле и в воде дышит, питая кровь кислородом – вторым по распространенности атмосферным газом. Дышат также и растения, поглощая углекислый газ и выделяя кислород [2].

Атмосфера обеспечивает *радиационный баланс* планеты, пропуская к поверхности Земли излучение в видимом и ближнем инфракрасном диапазоне и препятствуя оттоку от Земли дальнего инфракрасного и радиоизлучения.

Атмосфера обеспечивает *тепловой баланс* Земли посредством "парникового эффекта", оберегая ее от больших перепадов температуры, губительных для всего живого. Поэтому на Земле не бывает резких переходов от жары к холоду. Если бы не было воздушной оболочки Земли, то в течение суток температура менялась бы  $\approx 200^\circ\text{C}$ . Благодаря атмосфере средняя температура у поверхности земли составляет  $+15^\circ\text{C}$ .

Атмосфера обеспечивает *водный баланс* планеты, что принципиально важно в первую очередь для живого мира. Благодаря движению воздушных масс, процессам испарения и конденсации вода участвует в непрерывном мировом круговороте.

В среде атмосферы хорошо распространяется звук. При отсутствии атмосферы на Земле царил бы мертвая тишина и был бы невозможным контакт

---

<sup>1</sup>Под *стационарной атмосферой* здесь и далее понимается атмосфера небесного тела, основные физические параметры которой (масса, размеры, давление, химический состав и др.) не меняются существенным образом в процессе обращения данного тела вокруг Солнца.

живых существ посредством передачи звуковых сигналов, в частности, человеческая речь.

Атмосфера является *надежным щитом*, спасающим живые организмы Земли от губительных ультрафиолетовых, рентгеновских, гамма – и корпускулярных излучений, частично поглощая, частично рассеивая в своих верхних слоях все вредные излучения.

Именно благодаря атмосфере обитателям Земли *не страшны падения метеороидных дождей и отработанных малых искусственных спутников* (космического мусора), которые с собой несут значительные механические повреждения вплоть до полного разрушения объектов, встречающихся на их пути. Абсолютное большинство метеороидов и малых спутников сгорают в верхних слоях атмосферы и не долетают до земной поверхности.

В зависимости от состава газа в атмосфере выделяют *гомосферу* и *гетеросферу*. **Гетеросфера** – это область, где гравитация оказывает влияние на разделение газов, так как их перемешивание на такой высоте незначительно. Отсюда следует переменный состав гетеросферы. Ниже ее лежит хорошо перемешанная, однородная по составу часть атмосферы, называемая **гомосфера**. Граница между этими слоями называется турбопаузой, и в атмосфере Земли она лежит на высоте около 120 км.

Поскольку атмосферы Земли и других планет это смеси газов, то одни компоненты характеризуются большими, другие меньшими массами их частиц (или, что тоже самое, молярными массами). В результате с изменением высоты объемные доли различных газов не остаются постоянными. Это приводит, как следствие, к изменению молярной массы, постоянной адиабаты, молярной и удельной теплоемкости, скорости звука и других термодинамических параметров с увеличением высоты.

При решении многих задач физики атмосферы (в частности, в метеорологии), астрономии и космонавтики является принципиально необходимым знать указанные зависимости. Приведем пару наглядных примеров.

В работах Загородниковой В. [3] были получены обобщенная барометрическая формула для плотности и обобщенное распределение Больцмана однокомпонентного идеального газа, находящегося в поле тяжести планеты-шара. Результат оказался крайне полезным и был в последствие использован в целом ряде других работ [4, 5, 6]. Однако, при выводе данных результатов автор ограничился приближением постоянства молярной массы с ростом высоты. Такая ситуация имеет место в действительности лишь для газа, содержащего частицы одного вида. При расчете наблюдаемых для явления малого гало, в работе [3] использовалась модель однокомпонентной атмосферы с эффективной молярной массой, которая не зависела от высоты. А для смеси газов в атмосфере Земли, строго говоря, это не так. Аналогичная модель использо-

ввалась в работах Комендантяна А. и Тимаковой Д. [4, 5]. Поэтому для повышения точности прогнозов необходимо знать зависимость молярной массы от высоты.

В работе [6] этот недостаток был устранен, поскольку автор использовал модель мультикомпонентной атмосферы. На примере, атмосферы Марса выполнен численный анализ полученных результатов. Однако для других классических планет Солнечной системы (в частности, для Земли), это вопрос не рассматривался.

В работах [4, 6] рассматривалась проблема динамики сферического тела, падающего в атмосфере планеты. Как одной из перспектив развития своих исследований, авторы видят исследование термодинамических параметров атмосферной смеси газов. Здесь принципиально важно, знать зависимость молярной (удельной массовой) теплоемкости от высоты. А при исследовании характера движения необходимо знать скорость звука на разных высотах. Однако, авторы не ставили своей целью найти указанные зависимости.

Автором настоящей работы выполнен обширный литературный анализ, который показал, что в источниках, представленных для широкого круга читателей, искомые зависимости для атмосфер классических планет не представлены явно. В лучшем случае, представлены лишь таблицы дискретных данных для небольшого количества значений высоты [7].

В связи со сказанным главной целью настоящей работы является построение общего алгоритма расчета зависимостей термодинамических параметров (концентрации, массовой плотности, молярной массы, постоянной адиабаты, молярной и удельной массовой теплоемкости, скорости звука) для смеси газов от высоты над поверхностью классической планеты.

Согласно сформулированной цели основными задачами являются следующие положения:

1. Расчет концентрации и массовой плотности смеси из  $N$  идеальных газов атмосферы классической планеты как функции высоты над ее поверхностью.
2. Вычисление молярной массы, постоянной адиабаты и скорости звука для смеси из  $N$  идеальных газов атмосферы классической планеты как функции высоты над ее поверхностью.
3. Расчет молярной и удельной массовой теплоемкости для смеси из  $N$  идеальных газов атмосферы классической планеты как функции высоты над ее поверхностью.
4. Численный анализ полученных результатов на примере атмосферы Земли.

*Основными методами решения поставленных задач* являются:

1. Методы алгебраических преобразований.
2. Элементы термодинамики и статистической физики.

Данная работа имеет следующую структуру.

В **первой главе** изложены элементы физики атмосферы, теории идеального газа.

Во **второй главе** представлены решения поставленных теоретических задач и их анализ.

Резюме по проделанной работе представлено в **заключении**. Финальная часть работы содержит список использованных источников.

# Глава 1

## Атмосферы классических планет. Приближение изотермической атмосферы

В настоящей главе будут изложены современные представления об атмосферах Земли и других классических планет Солнечной системы. Отдельное внимание будет уделено свойствам идеального газа и приближению изотермической атмосферы.

### 1.1 Строение атмосферы Земли

*Атмосфера Земли* (от. др.-греч. атмосфер — «пар» и сфера — «шар») — газовая оболочка, окружающая планету Земля. Внутренняя ее поверхность покрывает гидросферу и частично кору, внешняя граничит с околоземной частью космического пространства. Совокупность разделов физики и химии, изучающих атмосферу, принято называть *физикой атмосферы*.

Основные физические свойства. Толщина атмосферы составляет примерно 2000 — 3000 км от поверхности Земли, однако следы атмосферного водорода и гелия прослеживаются вплоть до расстояний в  $10^5$  км. Суммарная масса воздуха равна  $(5.1 \div 5.3) \cdot 10^{18}$  кг. Молярная масса чистого сухого воздуха составляет 28.966 г/моль. Давление при  $0^\circ\text{C}$  на уровне моря равно 101.325 кПа; критическая температура равна  $140.7^\circ\text{C}$ ; критическое давление составляет 3.7 МПа;  $C_p = 1.0048 \cdot 10^3$  Дж/(кг·К) (при  $0^\circ\text{C}$ ),  $C_v = 0.7159 \cdot 10^3$  Дж/(кг·К) (при  $0^\circ\text{C}$ ). Растворимость воздуха в воде при  $0^\circ\text{C}$  составляет 0.036%, при  $25^\circ\text{C}$  — 0.22% [8].

На больших высотах, в разреженных слоях воздуха, распространение звука оказывается невозможным. До высот 60 — 90 км еще возможно использование сопротивления и подъемной силы воздуха для управляемого аэродинамического полета. Но начиная с высот 100 — 130 км, знакомые каждому летчику понятия числа Маха и звукового барьера теряют свой смысл, там проходит