

Одна из важнейших задач физических наук в настоящее время — ведение приходно-расходной книги солнечного тепла, получаемого земным шаром, с его воздушной и водной оболочкой.

Трудности достижения цели не могут испугать ученых, способных понять широкие задачи науки.

А. И. Вейков (1884 г.)

Раздел III

Тепловое состояние атмосферы

Глава 9. Турбулентное состояние атмосферы. Приземный слой

Ламинарное и турбулентное состояние атмосферы. Простейшие характеристики турбулентности. Конвективный и турбулентный потоки тепла. Уравнение притока тепла в турбулентной атмосфере. Определение и высота приземного слоя. Распределение температуры по высоте в приземном слое. Логарифмический закон. Методика расчета турбулентных потоков тепла по данным градиентных наблюдений.

Глава 10. Суточный ход температуры воздуха в пограничном слое атмосферы

Экспериментальные данные. Распределение температуры воздуха по высоте в пограничном слое атмосферы. Теория суточного хода температуры воздуха в пограничном слое атмосферы. О роли радиационных притоков тепла в пограничном слое атмосферы. Ночное понижение температуры. Заморозки

Глава 11. Взаимодействие атмосферы с подстилающей поверхностью (сушей и водой)

Уравнение теплопроводности почвы. Уравнение теплового баланса земной поверхности. Взаимодействие атмосферы с деятельным слоем. Температура земной поверхности. Вертикальное распределение температуры почв. Роль растительного и снежного покрова. Суточные и годовые колебания температуры воды в морях и крупных водоемах.

Глава 12. Термический режим тропосферы, стратосферы и мезосферы

Распределение температуры в тропосфере и нижней стратосфере. Термический режим стратосферы и мезосферы по ракетным данным. Влияние материков и океанов на распределение температуры в атмосфере. Периодические изменения температуры воздуха в тропосфере и стратосфере. Непериодические изменения температуры в различных слоях атмосферы. Стратосферные потепления. Особенности термического режима Арктики и Антарктики

Глава 9 Турбулентное состояние атмосферы. Приземный слой

1 Ламинарное и турбулентное состояние атмосферы

Атмосфера находится в непрерывном движении. Отличительная особенность атмосферных движений заключается в том, что движение отдельных частиц воздуха носит неупорядоченный характер. Режим движения, при котором отдельные частицы жидкости или газа имеют неправильные, хаотические траектории с поперечными и, даже попятными (по отношению к общему движению) перемещениями отдельных малых объемов, носит название *турбулентного*. При этом режиме скорость движения пульсирует, т. е. резко изменяет свое значение и направление в течение коротких промежутков времени. Турбулентное движение атмосферы оказывает большое влияние на состояние атмосферы и физические процессы, протекающие в ней.

Чтобы подойти к количественной характеристике турбулентного движения атмосферы, рассмотрим следующий опыт. В трубу, по которой течет жидкость, вводится струя подкрашенной жидкости. В трубе подкрашенная жидкость течет тонкой струйкой, пока скорость течения невелика. При увеличении скорости струйка становится извилистой, затем теряет резкие очертания и разбивается на отдельные вихри. Первый режим течения (при малых скоростях) называется ламинарным.

Ламинарный режим движения — это такой режим, при котором частицы жидкости или газа перемещаются параллельно друг другу по траекториям, представляющим плавные, лишь слегка изменяющиеся во времени кривые.

Теоретические и экспериментальные исследования показали, что характер движения жидкости или газа зависит от безразмерного числа, называемого *числом* (или параметром) *Рейнольдса*:

$$Re = \rho cl / \eta,$$

где ρ — плотность, c — скорость движения, l — характерный масштаб движения, η — динамический коэффициент молекулярной вязкости.

При малых числах Рейнольдса движение жидкости или газа носит ламинарный характер; при числе Re , равном критическому значению $Re_{кр}$, наблюдается переход из ламинарного движения в турбулентное, а при больших значениях Re движение становится полностью турбулентным. При постоянных ρ и η переходу ламинарного режима движения в турбулентный способствует увеличение скорости движения и его характерного масштаба. Увеличение же вязкости приводит к сохранению ламинарного движения до больших значений скорости.

Оценка числа Рейнольдса для атмосферных движений показывает, что подавляющая часть их носит турбулентный характер, за исключением движений в очень тонком слое воздуха (толщиной в несколько миллиметров), непосредственно прилегающем к земной поверхности (так называемый вязкий подслой). Однако степень развития турбулентного обмена может быть самой различной. Об этом можно судить хотя бы по наблюдениям за распространением дыма, выходящего из печных, фабричных и заводских труб. Вид струй дыма, выходящих из труб при разной степени турбулентности атмосферы, изображен на рис. 9.1.

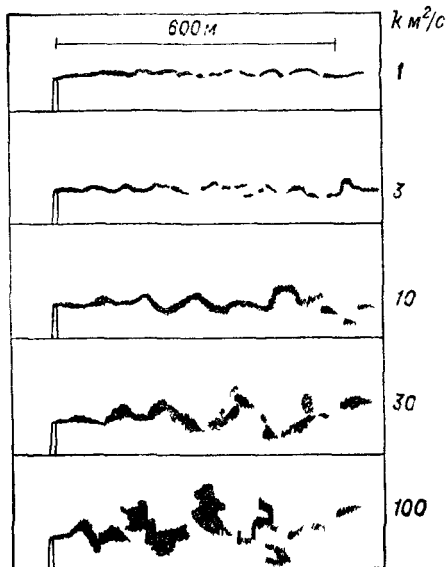


Рис. 9.1. Дымовая струя при разной степени турбулентности (k — коэффициент турбулентности).

При малых скоростях ветра, при устойчивой и особенно при инверсионной стратификации в нижнем слое атмосферы (например, при безоблачной погоде ночью или сильных морозах зимой в течение суток) дым распространяется в виде тонкой струи на значительное расстояние.

При большой скорости ветра струя дыма приобретает извилистый характер, а при сильной термической неустойчивости струя разбивается на отдельные части. При турбулентном режиме движения скорость ветра, температура и другие метеорологические величины, испытывают беспорядочные, быстро меняющиеся во времени колебания. Но наряду с хаотическим движением все частицы воздуха имеют некоторую среднюю скорость переноса. Благодаря этому *мгновенная скорость c^** движения воздушной частицы мо-

жет быть представлена в виде

$$c^* = c + c',$$

где c — средняя скорость движения, определенная путем осреднения за некоторый промежуток времени или по некоторому достаточно большому объему воздуха; c' — отклонение мгновенной скорости от средней, или *пульсация скорости*. В виде таких же сумм (но уже скалярных) представляются мгновенные значения других метеорологических величин.

В слоях атмосферы, где температура, плотность и скорость ветра изменяются с высотой (наблюдается расслоенность по вертикали), число Рейнольдса уже не может служить единственной характеристикой турбулентного состояния среды. В п. 5 главы 4 было показано, что одной из величин, от которых зависит движение частиц по вертикали, является **вертикальный градиент температуры** γ . Более общая теория турбулентности позволяет установить, что о развитии турбулентности в атмосфере можно судить по другому безразмерному параметру — числу Ричардсона Ri (см. п. 3 главы 21).

2 Простейшие характеристики турбулентности

В состав атмосферного воздуха входят переменные части (водяной пар, углекислый газ и озон) и всевозможные атмосферные примеси, представляющие собой мельчайшие твердые и жидкие частицы. Назовем *удельным содержанием* s примеси массу ее в единице массы воздуха. Применительно к водяному пару s представляет собой массовую долю пара. Наблюдения показывают, что удельное содержание примесей изменяется в атмосфере в широких пределах как во времени, так и в пространстве (при переходе из одной точки в другую). Удельное содержание s изменяется с увеличением высоты (как правило, падает), а также в горизонтальном направлении (концентрация твердых примесей в загородной местности, например, значительно меньше, чем в городе). В процессе турбулентного перемешивания происходит перемещение отдельных частиц (масс) воздуха из одной точки в другую как по вертикали, так и по горизонтали.

Отдельную воздушную частицу, участвующую в турбулентном перемешивании, принято называть *турбулентным моле*. Турбулентные моли отрываются от общего потока в одной точке, перемещаются на некоторое расстояние и смешиваются с потоком в другой точке пространства. В реальных условиях процесс смещения турбулентных молей происходит непрерывно: оторвавшаяся от общего потока воздушная частица постепенно начинает смешиваться