

То положение, что малые количественно незначительные причины могут быть достаточными для значительных изменений погоды, создает уверенность, что небольшие, доступные человеку средства, могут быть достаточными для искусственного

воздействия на погоду; вполне возможно небольшими воздействиями создавать искусственный дождь, устранять опасность обледенения и противодействовать образованию града.

В. Н. Оболенский (1938 г.)

Раздел IV

Облака, туманы и осадки

Глава 13. Общие условия фазовых переходов воды в атмосфере

Физические свойства льда, воды и водяного пара. Зависимость скрытой теплоты фазового перехода и давления насыщения от температуры. Другие факторы, влияющие на давление насыщения. Ядра конденсации

Глава 14. Влажность воздуха

Уравнение переноса водяного пара в турбулентной атмосфере. Распределение характеристик влажности по высоте в приземном слое. Распределение влажности в тропосфере и стратосфере. Распределение и суточный ход характеристик влажности в пограничном слое атмосферы. Испарение. Круговорот воды на Земле

Глава 15. Переохлаждение и замерзание воды в атмосфере

Понятие о равновесном и метастабильном состоянии. Основы теории образования кристаллов льда в атмосфере. Особенности самопроизвольного (спонтанного) образования ледяных зародышей в переохлажденной воде. Естественная кристаллизация облаков и туманов

Глава 16. Туманы

Физические условия образования и классификация туманов. Физические характеристики туманов. Модели об-

разования и строения туманов. Роль смещения масс воздуха в образовании туманов

Глава 17. Облака

Конвективные вертикальные движения. Кучевообразные (конвективные) облака. Волновые движения атмосферы. Волнистообразные облака. Динамика формирования слоистообразных токов, турбулентного обмена и радиации на профиль температуры. Статистические данные о слоистообразных и волнистообразных облаках. Основные результаты исследования облачных систем с помощью спутников. Глобальное поле облачности. Фазовое состояние облаков

Глава 18. Осадки

Классификация осадков. Процессы укрупнения облачных элементов и образования осадков. Скорость падения твердых и жидких частиц в атмосфере. Коэффициент соударения (захвата). Теория испарения и роста капель под влиянием конденсации. Распределение капель облаков и осадков по размерам. Рост капель облаков и осадков под влиянием гравитационной коагуляции. Роль твердой фазы в образовании осадков. Формирование града. Влияние других факторов на коагуляцию капель. Наземная конденсация и осадки. Активные воздействия на облака и туманы

Глава 13 Общие условия фазовых переходов воды в атмосфере

Водяной пар, в отличие от других газов, составляющих атмосферу, при наблюдаемых температурах воздуха может изменять свое агрегатное состояние, переходя в воду (жидкое состояние) или лед (твердое состояние). При этом капли воды и кристаллы льда могут находиться на близких расстояниях друг от друга, как это наблюдается в облаках, где происходят процессы таяния и испарения кристаллов льда, замерзания и испарения капель, конденсации и сублимации пара. В этих случаях пар, жидкая вода и лед представляют собой различные *фазы воды*, т. е. физически однородные части системы, способные переходить из одного состояния в другое, причем пар является газообразной, капли — жидкой и кристаллы льда — твердой фазой воды.

1 Физические свойства льда, воды и водяного пара

Важнейшая роль воды во многих природных процессах определяется рядом ее физических свойств, отличающихся от свойств других веществ. Кратко рассмотрим эти аномальные свойства воды.

1. Плотность почти всех веществ при понижении температуры и затвердевании увеличивается. Вода имеет наибольшую плотность, равную 1 г/см^3 , при температуре 4°C . При изменении температуры в ту и другую сторону от 4°C плотность воды уменьшается. При замерзании плотность воды уменьшается скачком — при 0°C плотность льда равна $0,91 \text{ г/см}^3$. Это свойство воды спасает водоемы от промерзания.

2. Теплоемкость веществ при их затвердевании меняется незначительно. Совершенно другим свойством обладает вода: удельная теплоемкость льда $c_{\text{л}} = 2114 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{K)}$ составляет примерно половину удельной теплоемкости воды.

3. Температуры замерзания и кипения воды значительно выше, чем у других родственных ей химических соединений; температуры замерзания и кипения родственных воде соединений понижаются с уменьшением их относительной молекулярной массы; переход к воде, имеющей меньшую относительную молекулярную массу

(по сравнению с другими веществами), сопровождается резким увеличением температур замерзания и кипения.

4. Удельная теплота плавления ($L_{пл}$) и удельная теплота парообразования (L) воды также аномально велики: $L_{пл} = 324$ кДж/кг, $L \approx 2500$ кДж/кг.

5. Вода обладает высокой растворяющей способностью и химической активностью.

6. Поверхностное натяжение воды выше, чем у других известных жидкостей ($72,8$ мДж/м² при 20°C).

Плотности льда и воды при изменении температуры изменяются столь незначительно, что практически их можно считать (при решении задач физики атмосферы) постоянными. Удельная теплоемкость воды c_v при изменении температуры изменяется так незначительно, что ее тоже можно считать постоянной величиной: $c_v = 4186,8$ Дж/(кг·К).

Удельные теплоемкости водяного пара можно считать не зависящими от температуры:

$$c_{vp} = 1386 \text{ Дж/(кг·К)}, \quad c_{rp} = 1846 \text{ Дж/(кг·К)}.$$

2 Зависимость скрытой теплоты фазового перехода и давления насыщения от температуры

Если в некотором замкнутом объеме находится жидкая вода и водяной пар, то непрерывно происходит отрыв молекул от поверхности жидкости и возвращение молекул водяного пара в жидкость. Нетрудно поставить следующий опыт.

В безвоздушное пространство, которое образуется при перевертывании наполненной ртутью трубки, подается вода. В первое время вода полностью испаряется. Ртуть в трубке при этом опускается, что свидетельствует о росте давления водяного пара в закрытом конце трубки. Однако испарение и рост давления водяного пара в некоторый момент прекращаются. Начиная с этого момента давление водяного пара сохраняет постоянное значение, а между водой и водяным паром в пространстве над ртутью устанавливается подвижное равновесие: количество вылетающих из воды молекул равно количеству возвращающихся.

Наибольшее значение давления водяного пара, возможное при данной температуре, носит название *давления насыщенного водяного пара* или *давления насыщения*.

Пока состояние насыщения не достигнуто, происходит процесс *испарения воды*: количество вылетающих молекул больше количества возвращающихся. При этом давление водяного пара над жидкостью меньше давления насыщения: $e < E$. Если количество возвращающихся молекул больше количества вылетающих, то