3. http://www.gumer.info/bibliotek_Buks/Science/mihail/03.php

Современная динамическая метеорология и её основные законы

Конецкий Е.С.
Белорусский национальный технический университет

Введение

Динамическая метеорология является одной из метеорологических дисциплин, котораяизучает атмосферные процессы на основе общих законов физики (гидромеханики и термодинамики). Движение воздуха возникает под влиянием неравномерного распределения давления. Неравномерность же распределения давления обусловлена процессами теплообмена в атмосфере и на ее границе с землей. Возникающие при этом атмосферные движения оказывают обратное влия-ние на процессы тепло- и влагообмена. Таким образом, атмосферные движения в совокупности с тепло- и влагообменом представляют собой основные факторы, определяющие погоду и климат.

Динамическая метеорология, изучая атмосферные движения во взаимосвязи с термодинамическими процессами, вскрывает основные закономерности погоды и климата, а затем использует эти закономерности для решения различных практических задач, важнейшими среди которых являются разработка объективных методов прогноза погоды и развитие теории воздействий на
погоду и климат.

Основным методом исследования в динамической метеорологии является преобразование и решение общих уравнений гидротермодинамики применительно к физическим условиям в атмосфере.

Исходные уравнения динамической метеорологии представляют собой выражение основных законов физики: закона сохранения импульса движения (второго закона Ньютона), закона сохранения энергии, закона сохранения массы.

Особенности атмосферных процессов, в соответствии с которыми осуществляется преобразование общих уравнений гидротермодинамики применительно к решению метеорологических задач, познаются путем обобщения фактических данных, полученных из наблюдений, а также на основании специальных экспериментальных исследований. При этом теоретические выводы проверяются путем сопоставления их с фактическими данными наблюдений и только после опытной проверки выводы теории используются для решения практических задач.

Таким образом, метеорологическая практика служит как источником, так и критерием правильности теории, которая указывает наиболее важные направления дальнейших экспериментальных исследований. Отсюда следует, что развитие динамической метеорологии тесно связано с синоптической метеорологией, климатологией, аэрологией и экспериментальной метеорологией.

1. История развития динамической метеорологии.

Первые попытки теоретического объяснения отдельных особенностей динамики атмосферы и атмосферной циркуляции восходят к 1-й половине 18 в. (английский учёный Дж. Хэдли). В начале 19 в. П. Лапласом была теоретически установлена связь между изменением атмосферного давления с высотой и температурой (барометрическая формула) и тем заложены основы статики атмосферы. В 1-й половине 19 в. возникла термодинамика, которая вскоре была применена к объяснению отдельных атмосферных процессов (таких, как фён). Однако только в 80-х гг. в работах немецких учёных Г. Герца, В. Бецольда и др. оформилась теория адиабатических процессов (т. е. процессов, в которых можно пренебречь теплообменом) в атмосфере, содержащей водяной пар; дальнейшее её развитие относится уже к 20 в. (английский учёный У. Н. Шоу, норвежские учёные А. Рефсдаль, Я. Бьеркнес и др.). В 1-й половине 19 в. французский учёный Г. Кориолис предложил теорему об относительном движении на вращающейся Земле, что позволило применить уравнения гидродинамики, сформулированные Л. Эйлером ещё в 18 в., к метеорологическим проблемам. У. Феррель (США) в ряде исследований, начатых в 1856, дал первую теоретическую модель общей циркуляции атмосферы, основанную на уравнениях гидромеханики, что способствовало оформлению Д. м. как научной дисциплины. В 80-х гг. 19 в. крупный вклад в развитие Д. м. внёс Г. Гельмгольц, предложивший теоретическую модель общей циркуляции поверхности разрыва (атмосферные фронты). В 1897 В. Бьеркнестеоремами о циркуляции и вихреобразовании положил начало «физической гидродинамике» атмосферы как сжимаемой жидкости наиболее общего типа (бароклинной жидкости), в которой распределение плотности зависит от распределения как давления, так и температуры. В 1904 он сформулировал задачу прогноза погоды как решение уравнений атмосферной термогидродинамики. Развитие идей В. Бьеркнеса определило дальнейшие успехи Д. м. В начале 20 в. М. Маргулес в Австрии, В. Бьеркнес и др. построили теорию атмосферных фронтов; Маргулес также заложил основы энергетики атмосферы. В это же время интенсивно изучалась атмосферная турбулентность, определяющая вертикальный обмен тепла, влаги, коллоидных примесей и количества движения в атмосфере.

В 20-х гг. 20 в. начинается быстрое развитие Д. м. в СССР; сформировалась советская школа Д. м., основанная А. А. Фридманом. Ещё в 1914 Фридман совместно с шведским учёным Т. Гессельбергом впервые дал оценки порядков величин основных метеорологических элементов (давления, температуры, влажности и др.) и их изменчивости, позволившие упростить уравнения Д. м. В 1922 Фридман построил и детально проанализировал общее уравнение для определения вихря скорости, характеристики местного вращения среды около мгновенных осей в движущейся жидкости, которое впоследствии приобрело фундаментальное значение в теории прогноза погоды. Н. Е. Кочин в 1931 решил задачу о потере устойчивости поверхности раздела между двумя воздушными массами, связанной с образованием циклонов, а в 1935 развил теорию общей циркуляции атмосферы, использовав идею о планетарном пограничном слое. А. А. Дородницын (1938, 1940) теоретически решил задачу о влиянии горного хребта на воздушный поток, в 1940 он рассчитал суточный ход температуры. Принципиальным шагом в решении основной практической задачи Д. м. — прогноза погоды — явилась работа И. А. Кибеля, в которой был дан метод прогноза поля давления и температуры на сутки (1940). Основы гидродинамического метода долгосрочных прогнозов были заложены в работе Е. М. Блиновой (1943). Один из узловых вопросов Д. м. — взаимосвязь полей давления и ветра в атмосфере — был исследован шведским учёным К. Г. Росби (1938) и успешно решён А.

М. Обуховым в СССР в 1949. В дальнейшем эта задача была обобщена в работах 1950-х гг. И. А. Кибеля и А. С. Монина, что позволило в 1960-х гг. перейти к более точным методам прогноза погоды. Первые численные прогнозы давления были выполнены в 1951 американским учёным Дж. Чарни и др. Существенным шагом в теории прогноза явились работы Г. И. Марчука и Н. И. Булеева (1953; СССР) и К. Хинкельмана (ФРГ), в которых впервые учитывалось влияние процессов на большой площади на изменение атмосферных условий в пункте, для которого рассчитывается прогноз. Появление в 50-х гг. ЭВМ и бурное развитие вычислительной математики дали толчок интенсивному развитию многих разделов динамической метеорологии. На сегодняшний день динамическая метеорология развивается очень интенсивными темпами, в виду интенсивного развития вычислительной и компьютерной техники, благодаря чему значительно увеличилась точность и скорость прогноза погоды.

2. Задача и основные проблемы динамической метеорологии.

Главная задача динамическая метеорологии — прогноз погоды, именно разработка численных методов прогноза метеорологических элементов (давления, температуры, ветра, облачности, осадков, видимости) на различные сроки на основе изучения общей циркуляции атмосферы, т. е. системы крупномасштабных переносов воздуха над нашей планетой.

Проблемы динамической метеорологии:

1) Изучение общей циркуляции атмосферы (ОЦА). Интегрирование уравнений динамической метеорологии. на длительные сроки при возможно полном учёте тепло- и влагообмена в атмосфере, а также термического и динамического взаимодействия океана и атмосферы позволило создать математическую модель ОЦА, которая в главных чертах соответствует данным наблюдений. Изменяя внешние параметры, можно выяснить причины аномалий климата, а также установить закономерности климата прошлых геологических эпох. Эти работы имеют значение и для теории долгосрочного прогноза погоды. Имеющиеся эмпирические сведения об атмосфере Земли ещё не вполне достаточны для построения полной модели ОЦА. В связи с этим важной задачей Д. м. является исследование глобальных атмосферных процессов путём изучения процессов переноса радиации конвекции и др.

2) Исследование турбулентности в атмосфере и гидросфере. Роль турбулентного обмена в атмосфере весьма велика; за редким исключением все атмосферные движения по существу являются турбулентными. Для развития и совершенствования теории турбулентности необходимо наряду с разработкой математических моделей развивать тонкие экспериментальные методы определения локальных и интегральных характеристик турбулентного обмена.

3) Прогноз погоды. Условно проблема делится на три части: краткосрочный прогноз на срок до 3 суток, долгосрочный прогноз (прогноз на 5—10 дней, прогноз на месяц и даже на сезон) и прогноз местных условий погоды. Начиная с 60-х гг. 20 в. прогнозы синоптического положения (преимущественно распределения давления и др. метеорологических элементов над обширным районом) на короткий срок методами динамической метеорологии. широко применяются в ряде стран с высокоразвитой вычислительной техникой (США, Великобритания, Франция, Швеция, Норвегия и др.). В опытном порядке составляются также долгосрочные прогнозы отдельных элементов (средняя температура и давление) на основе динамической метеорологии. Методы этих прогнозов более тесно связаны с моделями ОЦА, чем методы краткосрочного прогноза. Прогноз местных

условий погоды составляется пока преимущественно эмпирическим путём на основе прогноза общего синоптического положения. Теоретические подходы к такому прогнозу трудоёмки и сложны; на базе динамической метеорологии такие прогнозы составляются лишь в опытном порядке в наиболее хорошо оснащённых вычислительной техникой прогностических центрах. Широкое использование сверхбыстродействующих ЭВМ позволит разрабатывать прогностические схемы, в которых одновременно с долгоживущими особенностями метеорологического режима будут получать и короткоживущие, определяющие изменение условий погоды над небольшой территорией

3. Способы, законы и принципы используемые при решения проблем и задач динамической метеорологии.

Решение большинства вопросов и задач динамической метеорологии связано либо с определением пространственного распределения метеорологических величин в данный момент времени, либо с прогнозом погоды. Следовательно, основные задачи сводятся к нахождению функциональной зависимости метеорологических величин от координат и времени и к вычислению их значений в различных точках пространства в определенные моменты времени. Для этого должна быть составлена и решена замкнутая система уравнений, описывающая процессы, происходящие в атмосфере.

Ввиду исключительной сложности атмосферных процессов и множества различных факторов, определяющих закономерности их развития, составление замкнутой системы уравнений представляет значительные трудности.

Вследствие турбулентности воздуха приходится пользоваться усредненными уравнениями, а при усреднении появляются новые неизвестные величины. Распределение радиации в атмосфере зависит от облачности, а также от излучения и поглощения радиации атмосферными газами, имеющими очень сложный спектр. Точный учет этих факторов связан со значительными трудностями.

Однако при некоторых достаточно корректных допущениях все же может быть составлена замкнутая система уравнений и сформулированы начальные и краевые условия, которым должны удовлетворять ее решения.

При решении основных задач динамической метеорологии учитываются процессы, происходящие в тропосфере и нижней стратосфере до высоты примерно 35 км, где содержится около 95% всей массы атмосферы. Для описания закономерностей движения в этих слоях, атмосферу можно рассматривать как сплошную сжимаемую среду, находящуюся под действием силы земного притяжения и вращающуюся вместе с Землей вокруг ее оси.

Если не учитывать влияние турбулентности, например, предполагая, что движение является ламинарным, и пренебречь притоком тепла, а воздух рассматривать как баротропную среду, то при таких условиях закономерности движения атмосферы полностью могут быть определены
уравнениями движения и неразрывности, а также начальными и краевыми условиями. В этом простейшем случае три скалярных уравнения движения в проекциях на оси координат и уравнение неразрывности образуют замкнутую систему, состоящую из четырех уравнений и содержащую четыре неизвестных функции u, . v, w, P

С учетом бароклинности атмосферы, плотность которой зависит не только от давления, но и от температуры, появляется новая неизвестная функция - температура воздуха, которая связана с давлением и плотностью уравнением состояния $P = \rho RT$, являющимся алгебраическим соотношением, входящим в общую систему уравнений гидротермоди-

намики. При учете притока тепла к движущемуся воздуху, число неизвестных функций еще увеличивается, а к системе уравнений гидротермодинамики атмосферы добавляются уравнение притока тепла и, связанные с ним, уравнения переноса водяного пара и лучистой энергии.

Основным источником тепла, обусловливающим атмосферные движения, является лучистый приток тепла.

Суммарный поток лучистой энергии в атмосфере складывается: из потока длинноволнового излучения атмосферы A(m), направленного вниз, из потока длинноволнового излучения Земли и атмосферы B(m), направленного вверх, и из коротковолнового солнечного излучения S(m), направленного вниз.

Компоненты суммарного лучистого потока в атмосфере A(m), B(m), S(m) определяются
уравнениями:

$$A(m) = -\int_m^M E(T)dD(u-m)$$

$$B(m) = E(To)D(m) + \int_m^M E(T)dD(u-m)$$

$$S(m) = So\frac{L_o^2}{L^2}\cos v(1-\Gamma)\left[1 - 0.09\left(\frac{M-m}{\cos v}\right)^{0.303}\right]$$

Где $m = \int_0^z \rho q(z)\sqrt{\frac{P}{P_o}}dz$ - среднее количество водяного пара, содержащегося в столбе единичного сечения, взятое с весом $\sqrt{\frac{P}{P_o}}$; u - переменное значение величины m; $E(T) = \sigma T^4$ - излучение абсолютно черного тела (поток черной радиации); q(z) - удельная влажность воздуха на уровне z;

M = m(∞) - масса водяного пара в столбе атмосферы с единичным поперечным сечением; □- зенитный угол Солнца; Г - коэффициент, характеризующий отражение радиации на верхней границе атмосферы;

To и Po- температура и давление у подстилающей поверхности;
S_o - солнечная постоянная; L - расстояние от Земли до Солнца ; D(u)- функция пропускания для водяного пара.

Учитывая, что движение воздуха в атмосфере является турбулентным и что процессы, происходящие в турбулентной атмосфере, могут быть определены усредненными значениями метеорологических величин, необходимо усреднить и уравнения гидротермодинамики. При усреднении
же уравнений появляются новые неизвестные величины и система уравнений оказывается незамкнутой, то есть число неизвестных функций становится больше числа уравнений. Если в усредненных уравнениях статистические характеристики пульсаций метеорологических величин
выразить через соответствующие сглаженные (усредненные) величины и коэффициенты горизонтальной и вертикальной турбулентности k_x k_y и k_z
, то при известных их значениях система уравнений гидротермодинамики турбулентной атмосферы замыкается при отсутствии конденсации и испарения. Таким образом, получается десять уравнений, связывающих десять неизвестных функций $\bar{u}$, $\bar{v}$, $\bar{w}$, $\bar{P}$, $\bar{\rho}$, $\bar{O}$, $\bar{q}$, A(m), B(m), S(m), зависящих от координат и времени.

Пренебрегая пульсациями плотности, а также молекулярной вязкостью и теплопроводностью воздуха, систему уравнений гидротермодинамики атмосферы можно представить в следующем виде:

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{u}\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \bar{v}\frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \bar{w}\frac{\partial \bar{u}}{\partial z} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial \bar{P}}{\partial x} - 2\omega_y \bar{w} + 2\omega_z \bar{v} +$$
$$+\frac{\partial}{\partial x}\left(k_x\frac{\partial \bar{u}}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(k_y\frac{\partial \bar{u}}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(k_z\frac{\partial \bar{u}}{\partial z}\right);$$
$$\frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + \bar{u}\frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + \bar{v}\frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \bar{w}\frac{\partial \bar{v}}{\partial z} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial \bar{P}}{\partial y} - 2\omega_z \bar{u} + 2\omega_x \bar{w} +$$
$$+\frac{\partial}{\partial x}\left(k_x\frac{\partial \bar{v}}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(k_y\frac{\partial \bar{v}}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(k_z\frac{\partial \bar{v}}{\partial z}\right);$$
$$\frac{\partial \bar{w}}{\partial t} + \bar{u}\frac{\partial w}{\partial x} + \bar{v}\frac{\partial \bar{w}}{\partial y} + \bar{w}\frac{\partial \bar{w}}{\partial z} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial \bar{P}}{\partial y} - 2\omega_x \bar{v} + 2\omega_y \bar{u} +$$
$$+\frac{\partial}{\partial x}\left(k_x\frac{\partial \bar{w}}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(k_y\frac{\partial \bar{w}}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(k_z\frac{\partial \bar{w}}{\partial z}\right) - g;$$

$$\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} + \frac{\partial \overline{\rho u}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{\rho v}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{\rho w}}{\partial z} = 0$$
$$\frac{\partial \bar{\theta}}{\partial t} + \bar{u}\frac{\partial \bar{\theta}}{\partial x} + \bar{v}\frac{\partial \bar{\theta}}{\partial y} + \bar{w}\frac{\partial \bar{\theta}}{\partial z} = -\frac{1}{C_p \bar{\rho}}\left(E_л + E_ф\right) +$$

$$+\frac{\partial}{\partial x}\left(k_x\frac{\partial \theta}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(k_y\frac{\partial \bar{\theta}}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(k_z\frac{\partial \bar{\theta}}{\partial z}\right);$$

$$\frac{\partial \bar{q}}{\partial t} + \bar{u}\frac{\partial \bar{q}}{\partial x} + \bar{v}\frac{\partial \bar{q}}{\partial y} + \bar{w}\frac{\partial \bar{q}}{\partial z} = +\frac{\partial}{\partial x}\left(k_x\frac{\partial \bar{q}}{\partial x}\right) +$$
$$+\frac{\partial}{\partial y}\left(k_y\frac{\partial \bar{q}}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(k_z\frac{\partial \bar{q}}{\partial z}\right) + W$$

$$\bar{P} = \bar{\rho}\bar{R}\bar{T}$$

Составление полной системы уравнений, описывающей одновременно все процессы, происходящие в атмосфере, еще более усложняется. Однако, для приближенного решения ряда задах предпринятая схематизация процессов является допустимой и, более того, в зависимости от конкретных свойств изучаемого процесса она может быть значительно упрощена. Система уравнений гидротермодинамики наиболее значительно упрощается применительно к процессам, происходящим в свободной атмосфере, где в первом приближении можно пренебречь турбулентностью, а за сравнительно короткие периоды времени, порядка одних суток, можно пренебречь и влиянием притока тепла, считая, что воздух в свободной атмосфере движется адиабатически. При этом для крупномасштабных движений используется в качестве уравнения движения, спроектированного на вертикальную ось, уравнение квазистатики.

В пограничном слое атмосферы для определения коэффициентов турбулентного обмена привлекаются динамические уравнения турбулентности. Исходная метеорологическая информация обычно задается дискретно, в отдельных точках.

Кроме того, уравнения гидротермодинамики нестационарных процессов являются нелинейными дифференциальными уравнениями в частных производных, для которых найти точное аналитическое решение оказывается невозможно. По этим причинам эти уравнения решаются численными методами на высокопроизводительных компьютерах.

Заключение

В данном докладе представлена информация о динамической метеорологии,

По всем вышеприведенным подразделам можно сделать следующие выводы, а именно:

1. Динамическая метеорология является одной из метеорологических дисциплин, котораяизучает атмосферные процессы на основе общих законов физики (гидромеханики и термодинамики);
2. Динамическая метеорология, изучая атмосферные движения во взаимосвязи с термодинамическими процессами, вскрывает основные закономерности погоды и климата, а затем использует эти закономерности для решения различных практических задач, важнейшими среди которых являются разработка объективных методов прогноза погоды и развитие теории воздействий на погоду и климат;
3. Основным методом исследования в динамической метеорологии является преобразование и решение общих уравнений гидротермодинамики применительно к физическим условиям в атмосфере;
4. Особенности атмосферных процессов, в соответствии с которыми осуществляется преобразование общих уравнений гидротермодинамики применительно к решению метеорологических задач, познаются путем обобщения фактических данных, полученных из наблюдений, а также на основании специальных экспериментальных исследований. При этом теоретические выводы проверяются путем сопоставления их с фактическими данными наблюдений и только после опытной проверки выводы теории используются для решения практических .

Динамическая метеорология является очень перспективным направление развития метеорологии так как прогноз погоды используется во всех отраслях во всём мире.

В том числе и в дорожной отрасли так как успех и качество выполненных работ напрямую зависит от погодно климатических условий на месте строительства или эксплуатации дороги.

Литература

1. http://meteost.ru/help/opredelenie-meteorologii-i-klimatologi/
2. http://students.russianplanet.ru/geography/atmosphere/atmo8.htm
3. http://encyclop.ru/20160