

Модель расчета высоты конвективно-неустойчивого слоя атмосферы с учетом задерживающих слоев

А. И. Драбо, email: pigarev.andr@yandex.ru

А. Е. Пигарев, email: pigarev.andr@yandex.ru

А. С. Животворев, email: pigarev.andr@yandex.ru

ВУНЦ ВВС «ВВА им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина»
(г. Воронеж)

***Аннотация.** Представляется модель позволяющая определить давление на верхней границе и высоту конвективно-неустойчивого слоя как одного из информативных параметров атмосферной конвекции, используемых при прогнозировании конвективной облачности и связанных с ней опасных явлений погоды.*

***Ключевые слова:** модель, задерживающий слой, сухая адиабата, изограмма, конвективно-неустойчивый слой.*

Введение

Безопасность выполнения различных задач, выполняемых государственной авиацией, неразрывно связана с различными видами обеспечения полетов, одним из которых является метеорологическое обеспечение. Оно включает в себя процедуры анализа и прогноза метеорологических величин и явлений погоды. Особое место занимают явления погоды, обусловленные конвективной облачностью (грозы, ливневые осадки, ухудшающие видимость ниже установленных минимумов, обледенение, электризация, атмосферная турбулентность сильной интенсивности). Сложность диагноза и прогноза указанных явлений заключается в их стохастичности и пространственно-временной неравномерности.

Повышение точности прогноза конвективных явлений оказывает непосредственное влияние на качество метеорологического обеспечения государственной авиации и безопасности полетов в целом. Достижение этой цели предполагается за счет использования модели расчета атмосферного давления на верхней границе конвективно-неустойчивого слоя (КНС) с учетом ярко выраженных задерживающих слоев (инверсия и изотермия). КНС обладает большими энергетическими запасами и оказывает существенное влияние на образование конвективных явлений.

1. Модель расчета высоты КНС при наличии задерживающих слоев

Алгоритм графического построения КНС с использованием аэрологической диаграммы представлен в [1].

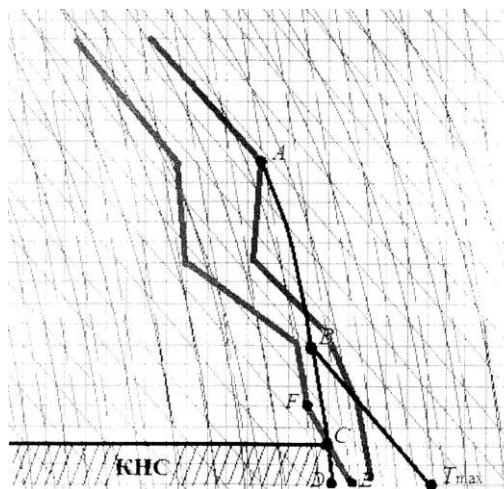


Рис. 1. Определение КНС при выраженном задерживающем слое

На рис. 1 точка B является точкой пересечения сухой адиабаты, проведенной через точку с температурой $T = T_{\max}$, спрогнозированной по способу Бельского [3], с влажной адиабатой проведенной из точки A (верхней границы задерживающего слоя). Из точки B проводится изограмма до пересечения с кривой точек росы (точка C). Давление в этой точке соответствует давлению на верхней границе КНС.

Программная реализация данного алгоритма с целью ускорения процесса определения давления на верхней границе КНС и отказа от графических построений потребовала разработку математической модели, содержание которой представлено далее.

1. По данным радиозондирования атмосферы разрабатывается прогноз максимальной температуры воздуха на день [3] и определяется T_{\max} .

2. По этим же данным определяется температура T_A и давление p_A в точке A .

3. Рассчитывается массовая доля водяного пара Sm_A в точке A :

$$Sm_A = Sm_C = \frac{8,615 T_A}{3799 \cdot 10^{273,15 + T_A}} \cdot P_A \quad (1)$$

4. Определяется псевдоэквивалентная температура в точке A :

$$Tp_A = T_A + \frac{L}{c_p} Sm_A \quad \text{или} \quad Tp_A = T_A + \Delta T_A, \quad (2)$$

где L – скрытая теплота парообразования; c_p – удельная теплоемкость воздуха при постоянном давлении; величина $\frac{L}{c_p} Sm_A = \Delta T_A$ – виртуальный добавок.

5. Рассчитывается псевдопотенциальная температура в точке A :

$$\theta p_A = Tp_A \left(\frac{1000}{P_A} \right)^{0,286} \quad (3)$$

6. Точка B расположена на одной влажной адиабате с точкой A , что указывает на постоянство псевдопотенциальных температур в этих точках, то есть $\theta p_A = \theta p_B$. Тогда:

$$\begin{aligned} \theta p_A &= (T_B + \Delta T_B) \left(\frac{1000}{P_B} \right)^{0,286}, \\ \theta p_A &= T_B \left(\frac{1000}{P_B} \right)^{0,286} + \frac{L}{c_p} Sm_B \left(\frac{1000}{P_B} \right)^{0,286}, \\ \theta p_A &= T_{\max} + \frac{L}{c_p} Sm_B \left(\frac{1000}{P_B} \right)^{0,286}. \end{aligned} \quad (4)$$

7. Точка B является точкой пересечения влажной адиабаты AB и сухой адиабаты, проходящей через точку с максимальной температурой T_{\max} . Тогда можно записать:

$$\begin{cases} \theta p_A = T_{\max} + \frac{9497,5 \cdot 10^{\frac{T_a}{273,15 + T_a}}}{P_B} \left(\frac{1000}{P_B} \right)^{0,286} \\ T_B = T_{\max} + \gamma_B z_B \end{cases} \quad (5)$$

где γ_B – вертикальный градиент температуры; z_B – высота точки B .

8. Переход от давления p_B к высоте z_B осуществляется с использованием барометрической формулы:

$$z_B = \ln \left(\frac{p_0}{p_B} \right) \frac{R_c T_0}{g} \quad \text{или} \quad z_B = 29 T_0 \ln \left(\frac{p_0}{p_B} \right), \quad (6)$$

где p_0 и T_0 – давление и температура воздуха у поверхности земли по данным радиозондирования атмосферы; R_c – удельная газовая постоянная сухого воздуха; g – ускорение свободного падения.

9. Выразив из первого уравнения системы (5) давление p_B в точке B получим:

$$p_B = \sqrt{\frac{\frac{68487 \cdot 10^{273,15+T_B}}{T_B}}{\theta p_{A-T_{\max}}}}. \quad (7)$$

Следует отметить, что выражение (7) содержит две неизвестных, а именно T_B и p_B . Данный факт указывает на трансцендентность системы (5), аналитическое решение которой в настоящее время является затруднительным. Выход из этой ситуации возможен путем введения некоторых упрощений, например, путем замены влажной адиабаты, проведенной до пересечения с сухой адиабатой через точку T_{\max} на соответствующий отрезок изограммы, а также с использованием надстройки «Подбор параметра» Microsoft Excel.

10. По второму уравнению системы (5) рассчитывается температура в точке B :

$$T_B = T_{\max} + 29 \gamma_B T_0 \ln \left(\frac{p_0}{p_B} \right), \quad (8)$$

11. Рассчитывается массовая доля водяного пара Sm_B в точке B :

$$Sm_B = \frac{\frac{8,615 T_B}{3799 \cdot 10^{273,15+T_B}}}{p_B}. \quad (9)$$

12. Определяется температура в точке D , являющаяся пересечением изограммы, проходящей через точку B с изобарой приземного давления $p_0 = p_D$. Тогда с учетом выражения (8):

$$T_B = \left(273,15 \cdot \lg \left(\frac{Sm_B \cdot p_0}{3799} \right) \right) / \left(8,615 - \lg \left(\frac{Sm_B \cdot p_0}{3799} \right) \right). \quad (10)$$

13. По температуре и давлению в точках B и D получаем уравнение изограммы BD :

$$p = \frac{p_B - p_0}{T_B - T_D}(T - T_D) + p_0 . \quad (11)$$

14. По данным радиозондирования атмосферы определяется температура точки росы T'_F и давление p_F в точке F и строится уравнение кривой точек росы на участке FE :

$$T = \frac{T'_F - T'_0}{p_F - p_0}(p - p_0) + T'_0 . \quad (12)$$

15. Решение системы уравнений (11) – (12) относительно $p = p_C$ позволяет получить значение давления на верхней границе КНС:

$$p_C = a \left(\frac{p_0 - p_F + aT'_F - bT_D}{a - b} \right) + p_0 , \quad (13)$$

где $a = \frac{p_0 - p_F}{T'_0 - T'_F}$; $b = \frac{p_B - p_0}{T_D - T_B}$.

Заключение

Рассмотренный подход к решению задачи определения давления на верхней границе КНС при наличии задерживающих слоев в атмосфере позволяет существенно ускорить процесс определения одного из основных параметров атмосферной конвекции. Кроме того, возможно построение моделей КНС для различных видов стратификации атмосферы, рассмотренных в [3]. Давление на верхней границе (высота) КНС является информативным показателем, используемым при прогнозировании конвективной облачности и связанных с ней опасных явлений погоды.

Список литературы

1. Руководство по практическим работам метеорологических подразделений авиации Вооруженных сил. – М.: Воениздат, 1971. – 488 с.
2. Скирда, И. А. Авиационные прогнозы погоды / И. А. Скирда, И. И. Ульшин, А. Б. Мартышкин. – Воронеж: ВУНЦ ВВС «ВВА», 2014 – 475 с.
3. Матвеев, Л. Т. Основы общей метеорологии. Физика атмосферы / Л. Т. Матвеев. – Л.: Гидрометеиздат, 2000. – 778 с.