ORO TEMPERATŪROS KITIMAS KINTANT AUKŠČIUI, ATMOSFEROS STABILUMAS IR ORO UŽTERŠTUMAS

Vertikalusis oro judėjimas lemia daugelį atmosferos reiškinių, tokių kaip debesų ir kritulių susidarymas bei oro teršalų išsisklaidymas. Jei atmosfera *stabili*, vertikalusis atmosferos judėjimas apribotas, todėl oro teršalai labiau linkę telktis apie tam tikrą jų emisijos vietą, negu išsisklaidyti ar ištirpti. Tuo tarpu *nestabilioje* atmosferoje vertikalusis judėjimas skatina vertikalųjį oro teršalų išsisklaidymą. Tuo būdu teršalų koncentracijos priklauso ne tik nuo emisijos šaltinio stiprumo, bet taip pat ir nuo atmosferos *stabilumo*.

Atmosferos stabilumą apibrėšime naudodamiesi *oro paketo* koncepcija, vartojama meteorologijoje, ir palyginsime oro paketo temperatūrą, kai šis atmosferoje adiabatiškai kyla ar leidžiasi, su supančio oro temperatūra. Daugeliu atvejų mes matysime, kad oro paketas su oro teršalais kyla nuo žemės ir sustoja tam tikrame aukštyje, vadinamame *maišymosi aukščiu.* Kuo didesnis maišymosi aukštis, tuo mažesnė oro teršalų koncentracija. Mes įvertinsime maišymosi aukštį ir iš motociklų išmetamo anglies monoksido koncentraciją Hanojaus regione rytinio transporto kamščio metu, kai vertikalusis maišymasis uždraustas dėl temperatūros inversijos (temperatūra auga didėjant aukščiui), kai aukštis viršija 119 m.

Nagrinėkime orą kaip idealias dviatomes dujas, kurių molinė masė $\mu = 29$ g/mol.

Tam tikro kiekio dujų slėgis p ir tūris V kvaziadiabatinio proceso metu paklūsta lygčiai $pV^{\gamma} = \text{const}$, čia $\gamma = \dfrac{c_p}{c_V}$ - dujų izobarinės ir izochorinės šiluminių talpų santykis.

Esant reikalui galima naudoti šias konstantas:

Universalioji dujų konstanta $R = 8.31\ \text{J/mol.K}$.

Atmosferos slėgis ties žemės paviršiumi $p_0 = 101.3\ \text{kPa}$.

Laisvojo kritimo pagreitis $g = 9.81\ \text{m/s}^2$.

Molinė izobarinė savitoji šiluma: oro $c_p = \dfrac{7}{2}R$.

Molinė izochorinė savitoji šiluma: oro $c_V = \dfrac{5}{2}R$.

Pagalbinės formulės

a.
$$\int \frac{dx}{A+Bx} = \frac{1}{B}\int \frac{d(A+Bx)}{A+Bx} = \frac{1}{B}\ln\,(A+Bx)$$

b. Diferencinės lygties $\frac{dx}{dt}+Ax=B$ (čia A ir B - konstantos) sprendinys

$x(t)=x_1(t)+\frac{B}{A}$. Čia $x_1(t)$ – diferencinės lygties $\frac{dx}{dt}+Ax=0$ sprendinys.

c. $\lim_{x\to\infty}\left(1+\frac{1}{x}\right)^x = e$

1. Slėgio kitimas didėjant aukščiui

1.1. Tarkime, kad atmosferos temperatūra vienoda ir lygi T_0. Užrašykite išraišką, rodančią, kaip atmosferos slėgis priklauso nuo aukščio z.

1.2. Tarkime, kad atmosferos temperatūra kinta didėjant aukščiui pagal šį sąryšį:

$T(z)=T(0)-\Lambda z$,

čia Λ - konstanta, vadinama atmosferos *temperatūros gradientu* (vertikalusis temperatūros gradientas yra -Λ).

1.2.1. Užrašykite formulę, aprašančią atmosferos slėgį p kaip aukščio z funkciją.

1.2.2. Reiškinys, vadinamas laisvąja konvekcija, atsiranda, kai oro tankis didėja, didėjant aukščiui. Kokioms Λ vertėms atsiranda laisvoji konvekcija?

2. Oro paketo temperatūros kitimas vertikaliojo judėjimo atveju

Panagrinėkime oro paketą, judantį atmosferoje aukštyn ir žemyn. Oro paketas - tai gana didelių matmenų kūnas (kelių metrų dydžio), į kurį gali būti žiūrima kaip į termodinaminį objektą, bet tuo pačiu metu jis gana nedidelis tam, kad jam galima būtų priskirti vienodą temperatūrą. Vertikalusis oro paketo judėjimas gali būti laikomas kvaziadiabatiniu, t.y. šilumos keitimasis su aplinkos oru nežymus. Jei oro paketas atmosferoje kyla, jis plečiasi ir vėsta. Ir atvirkščiai, jei jis juda žemyn, kylantis aplinkos slėgis spaudžia orą paketo viduje, todėl jo temperatūra didėja.

Kadangi paketo matmenys nedideli, atmosferos slėgis skirtinguose paketo ribų taškuose gali būti laikomas vienodas ir lygus $p(z)$, čia z – paketo centro aukštis. Temperatūra paketo viduje vienoda ir lygi $T_{\text{parcel}}(z)$, kuri bendru atveju skiriasi nuo supančio oro temperatūros $T(z)$. Dalyse 2.1 ir 2.2 nedarome jokių prielaidų apie $T(z)$ priklausomybės formą.

2.1. Paketo temperatūros $T_{\text{parcel}}(z)$ kitimas didėjant aukščiui apibūdinamas dydžiu $\frac{\mathrm{d}T_{\text{parcel}}}{\mathrm{d}z} = -G$. Išveskite $G(T, T_{parcel})$ išraišką.

2.2. Panagrinėkime atskirą atmosferos atvejį, kai bet kuriame aukštyje z atmosferos temperatūra T lygi paketo temperatūrai T_{parcel}, t.y. $T(z) = T_{\text{parcel}}(z)$. Mes naudosime raidę Γ žymėti G, kai $T = T_{\text{parcel}}$, taigi $\Gamma = \frac{\mathrm{d}T_{\text{parcel}}}{\mathrm{d}z}$ (čia $T = T_{\text{parcel}}$). Γ vadinamas *sausojo oro adiabatiniu gradientu*.

2.2.1. Išveskite Γ išraišką.

2.2.2. Apskaičiuokite skaitinę Γ vertę.

2.2.3. Išveskite atmosferos temperatūros $T(z)$ kaip aukščio funkcijos išraišką.

2.3. Tarkime, kad atmosferos temperatūra priklauso nuo aukščio tokiu būdu: $T(z) = T(0) - \Lambda z$, čia Λ - konstanta. Raskite paketo temperatūros priklausomybę nuo aukščio, t.y. $T_{\text{parcel}}(z)$.

2.4. Užrašykite apytikrę išraišką $T_{\text{parcel}}(z)$, kai $|\Lambda z| << T(0)$ ir $T(0) \approx T_{parcel}$.

3. Atmosferos stabilumas

Šioje dalyje tariame, kad T nuo aukščio priklauso tiesiškai.

3.1. Panagrinėkime oro paketą esantį pusiausvyroje su supančiu oru aukštyje z_0, t. y. tos pačios temperatūros $T(z_0)$ kaip ir supantis oras. Jeigu paketas truputį pasislenka į viršų arba į apačią (pvz., dėl atmosferos turbulencijos) galimi trys tolimesni procesai:

- Oro paketas grįžta į savo pirminę padėtį aukštyje z_0, paketas yra stabilus. Atmosfera yra stabili.
- Oro paketas tęsia judėjimą pradine kryptimi, paketas yra nestabilus. Atmosfera yra nestabili.
- Oro paketas lieka naujoje padėtyje, jo pusiausvyra universali. Sakoma, kad atmosfera yra neutrali.

Kokioms Λ dydžių sąlygoms esant atmosfera yra stabili, nestabili ir neutrali?

3.2. Paketo temperatūra ties žemės paviršiumi $T_{\text{parcel}}(0)$ aukštesnė negu supančio oro temperatūra $T(0)$. Keliamoji jėga jį kelia. Išveskite paketo maksimalaus pakilimo aukščio išraišką, esant stabiliai atmosferai, per Λ ir Γ.

4. Maišymosi aukštis

4.1. 1-oje lentelėje surašytos oro temperatūros skirtinguose aukščiuose, gautos iš meteorologinio zondo 7 valandą ryte Hanojuje lapkričio mėnesį.

Nagrinėsime temperatūros $T_{\text{parcel}}(0) = 22^{\circ}C$ oro paketą, kylantį nuo žemės paviršiaus. Iš 1-os lentelės domenų, naudojant tinkamas tiesines aproksimacijas, apskaičiuokite paketo temperatūrą 96 m ir 119 m aukščiuose.

4.2. Nustatykite didžiausią aukštį *H,* į kurį gali pakilti paketas, ir jo temperatūrą $T_{\text{parcel}}(H)$ šiame aukštyje.

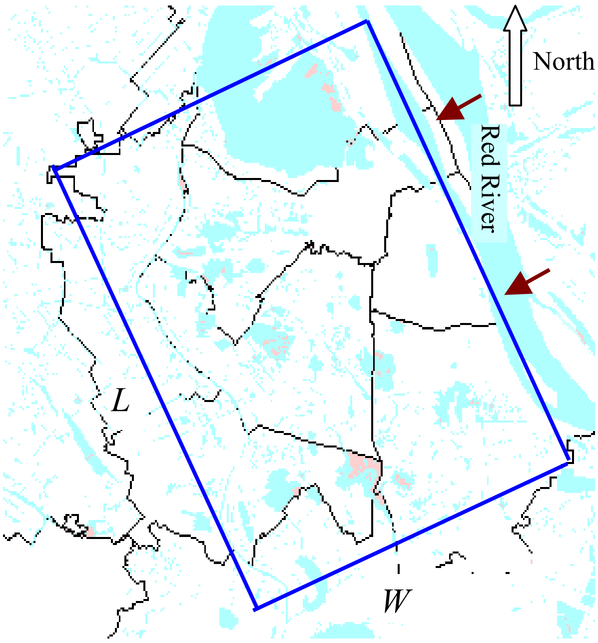
H yra vadinamas maišymosi aukščiu. Oro teršalai, pakilę su paketu nuo žemės paviršiaus, šiame aukštyje gali (dėl vėjo, turbulencijos, dispersijos ir t. t.) susimaišyti su aplinkiniu oro sluoksniu ir ištirpti jame.

1 lentelė. Oro temperatūros skirtinguose aukščiuose.

Aukštis,m	Temperatūra, ^{o}C
5	21.5
60	20.6
64	20.5
69	20.5
75	20.4
81	20.3
90	20.2
96	20.1
102	20.1
109	20.1
113	20.1
119	20.1
128	20.2
136	20.3
145	20.4
153	20.5
159	20.6
168	20.8
178	21.0
189	21.5
202	21.8
215	22.0
225	22.1
234	22.2
246	22.3
257	22.3

5. Anglies monoksido (CO) taršos įvertinimas rytiniame Hanojuje

Hanojaus regioną aprašysime stačiakampiu su kraštinėmis ilgio L išilgai pietvakarinio Raudonosios upės kranto, ir pločio W, kaip parodyta paveiksle.



Tarsime, kad ritinio piko valandos metu (nuo 7:00 iki 8:00) 5×10^5 motociklų nuvažiuoja vidutiniškai 5 km, išmesdami į atmosferą 12 g CO kiekviename kilometre. Tarkime, kad visas šis deguonies monoksido kiekis išleidžiamas šią valandą tolygiai pastoviu greičiu M. Tuo pat metu šiaurės-rytų vėjas, pučiantis statmenai Raudonajai upei (t. y. statmenai L) greičiu u, kerta miestą tuo pačiu greičiu ir išneša dalį CO.

Mes darome tai pat ir tokias prielaidas:

- CO plinta taip greitai, kad vidutinė koncentracija $C(t)$ stačiakampyje gretasienyje, sudarytame iš Hanojaus regiono ir anksčiau rasto aukščio (LxWxH) bet kurio laiko momentu t yra ta pati.
- Atnešamas vėjo oras yra švarus, o tarša neišnešama per sieneles, lygiagrečias vėjo krypčiai.
- Iki 7:00 oro tarša mieste yra nykstamai maža.

5.1. Išveskite diferencinę lygtį, aprašančią taršos koncentracijos $C(t)$ priklausomybę nuo laiko.

5.2. Užrašykite $C(t)$ išraišką kaip lygties sprendinį.

5.3. Apskaičiuokite teršalų koncentraciją 8:00 val., kai L = 16 km, W = 8 km, u = 1 m/s.