



Wpływ wzrostu stężenia CO₂ w atmosferze na proces absorpcji promieniowania termicznego

JAN KUBICKI, KRZYSZTOF KOPCZYŃSKI,
JAROSŁAW MŁYŃCZAK

Wojskowa Akademia Techniczna, Instytut Optoelektroniki,
ul. gen. S. Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa, jan.kubicki@wat.edu.pl,
krzysztof.kopczynski@wat.edu.pl, jaroslaw.mlynczak@wat.edu.pl

Streszczenie. W pracy przedstawiono problem wpływu wzrostu stężenia dwutlenku węgla w atmosferze na wzrost w niej absorpcji promieniowania termicznego. Zwrócono uwagę na różnice wyników obliczeń w pracach różnych autorów. Opracowana została prosta metoda pomiarowa, przy pomocy której, wykorzystując promieniowanie podczerwone z Księżyca, potwierdzono możliwość nasycenia się procesu absorpcji promieniowania termicznego dla CO₂ w atmosferze. Następnie przedstawiono propozycję prowadzenia dalszych prac eksperymentalnych umożliwiających doskonalenie i weryfikację komputerowych modeli klimatycznych.

Słowa kluczowe: procesy radiacyjne, równanie Schwarzschilda, gazy cieplarniane, absorpcja promieniowania termicznego

DOI: 10.5604/01.3001.0014.8870

1. Wprowadzenie

Duża część przedstawionego w pracy materiału wraz z opisem przeprowadzonego eksperymentu została w wersji anglojęzycznej zaprezentowana w pracy [1]. W tej publikacji poszerzono i poprawiono niektóre rozdziały oraz uzupełniono pracę o wizję proponowanego nowego eksperymentu.

Powszechnie znany jest skład atmosfery ziemskiej. Ma on istotny wpływ na transmisję przepuszczanego przez nią promieniowania, zwłaszcza w zakresie podczerwieni. Zagadnienia te są szeroko opisywane w literaturze [2, 3, 4, 5, 6]. Ich znajomość pozwala określać możliwości wykorzystywania rozmaitych urządzeń optoelektronicznych,

zwłaszcza gdy interesuje nas ich większy zasięg. Wyniki badań w tej dziedzinie mogą być przydatne między innymi przy wykorzystaniu termowizji, w zdalnym wykrywaniu par i gazów, przy wykorzystywaniu promieniowania podczerwonego do przesyłania informacji na dalsze odległości, a także do badań klimatycznych. Jednak w każdym z tych przypadków rozpatrywane są nieco inne zagadnienia. W związku z tym wymagane jest indywidualne podejście do każdego z nich.

Dla wiązki laserowej, w której długość fali promieniowania nie pokrywa się z pasmem absorpcji gazów występujących w atmosferze, absorpcja rezonansowa praktycznie nie występuje. Można jednak taką wiązkę wykorzystać do wykrywania par i gazów, które w atmosferze znajdują się przypadkowo. Oczywiście ich pasma absorpcyjne muszą się pokrywać z długością fali promieniowania tej wiązki. Analogiczna sytuacja będzie w przypadku przenoszenia informacji na łączach optycznych. Staramy się tu również wybierać promieniowanie, którego długości fal nie pokrywają się z pasmami absorpcyjnymi gazów w atmosferze [7, 8, 9].

Nieco bardziej złożony jest proces absorpcji promieniowania o ciągłym rozkładzie widma, na przykład promieniowania termicznego. Mamy z nim do czynienia między innymi przy wykorzystaniu termowizji. Wiązka promieniowania termicznego emitowanego przez obserwowany przedmiot oddziałuje z parami i gazami w atmosferze. W wyniku tego zniekształceniu ulega widmo promieniowania. Ostatecznie może to prowadzić do zniekształcenia obserwowanego w kamerze obrazu termicznego [10, 11].

Szczególnie dużo uwagi do zniekształceń widma promieniowania termicznego i nasycenia absorpcji tego promieniowania należy przywiązywać przy analizie procesów cieplarnianych [12, 13, 14]. Na stan atmosfery najczęściej nie mamy większego wpływu. Może nas jednak zainteresować, jak wprowadzenie dodatkowej ilości absorbującego gazu wpłynie na rozpatrywane procesy i w jakim stopniu osłabi przechodzącą wiązkę promieniowania.

2. Przybliżony opis zjawiska pochłaniania promieniowania termicznego w atmosferze

Propagację promieniowania podczerwonego o natężeniu I i częstotliwości ν , przechodzącego przez gazowy ośrodek absorpcyjny o temperaturze T , przy pominięciu rozpraszania, można w ogólny sposób opisać równaniem Schwarzschilda w postaci [15]:

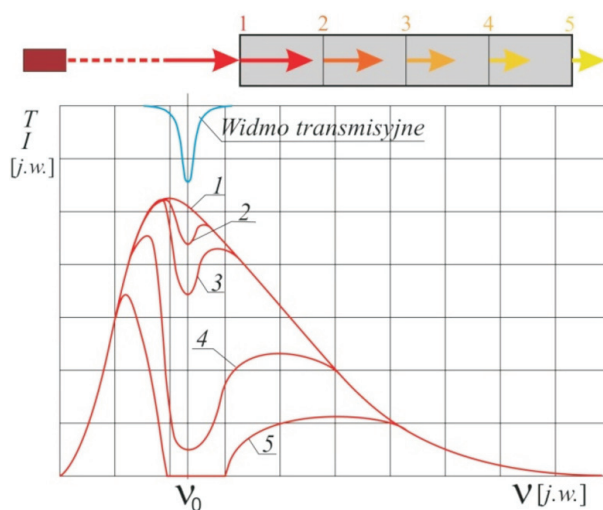
$$\frac{dI_\nu}{d\tau} = -I_\nu + B_\nu(T) \quad (1)$$

gdzie: $d\tau = k\nu\rho ds$, τ — grubość optyczna mierzona prostopolnie (przy zaniedbaniu refrakcji w atmosferze), k_ν — masowy współczynnik absorpcji, ρ — gęstość ośrodka absorpcyjnego, s — droga propagacji, $B_\nu(T)$ — funkcja Kirchhoffa–Plancka.

Gdy źródłem promieniowania jest ciało doskonale czarne i temperatura gazowego ośrodka absorpcyjnego jest znacznie niższa od temperatury tego ciała, funkcję $B_\nu(T)$ można pominąć i równanie (1) przyjmie różniczkową postać prawa Lamberta–Beera. Dla promieniowania monochromatycznego, o częstotliwości dopasowanej do pasma absorpcji odpowiedniego gazu absorpcyjnego, jego natężenie przy propagacji w atmosferze będzie się zmniejszało eksponencjalnie.

Przy dostatecznie dużej wartości τ , wzrastającej np. na skutek wzrostu stężenia substancji absorbującej, wartość tego natężenia stanie się pomijalnie mała. Możemy wówczas mówić o nasyceniu stężenia substancji absorbującej. Przejawia się tym, że dalszy wzrost stężenia wspomnianego gazu nic nie wnosi, bo praktycznie nie będzie rozpatrywanego promieniowania.

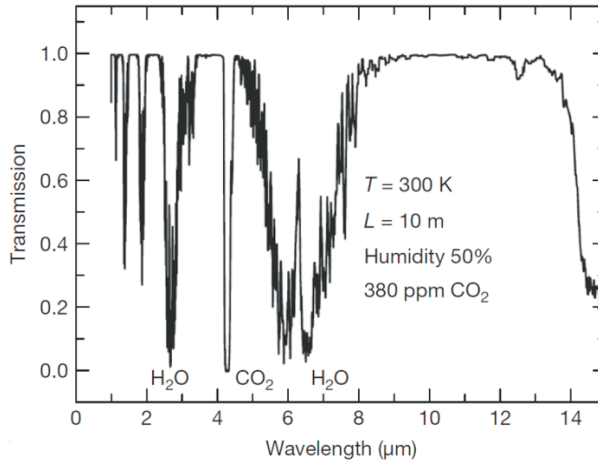
Jednak dla ciągłego widma promieniowania termicznego sytuacja jest bardziej złożona. Przybliżony jakościowy obraz zachodzących wówczas procesów można zilustrować przy pomocy rysunku 1.



Rys. 1. Zniekształcenie widma promieniowania przechodzącego przez ośrodek absorpcyjny

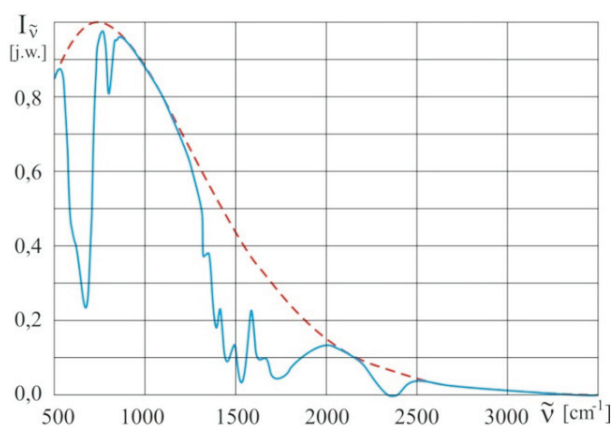
Pokazano na nim promieniowanie emitowane z ciała doskonale czarnego o rozkładzie widmowym 1 propagujące się przez ośrodek absorpcyjny z przedstawionym widmem transmisyjnym. Po przejściu przez kolejne warstwy ośrodka natężenie promieniowania o częstotliwości ν_0 zmniejsza się stosunkowo szybko, natomiast na innych częstotliwościach zmiany są wolniejsze lub nie ma ich wcale. W wyniku tego widmo promieniowania ulega zmianie, przyjmując postać 2, 3, 4, 5. Proces staje się więc bardziej złożony niż dla promieniowania monochromatycznego. Osłabienia natężenia całego promieniowania nie można już teraz opisać funkcją eksponencjalną.

W atmosferze ziemskiej znajduje się wiele gazów i par absorbujących promieniowanie podczerwone. Ich widma absorpcyjne niekiedy nakładają się na siebie. Ostatecznie widmo transmisyjne atmosfery, dla określonego zakresu liczby falowej, przyjmuje postać przedstawioną na rysunku 2 [16].



Rys. 2. Widmo transmisyjne atmosfery $T(\lambda)$ dla poziomej propagacji, przy grubości 10 m [16]

W przypadku gdy źródłem promieniowania jest ciało doskonale czarne (lub doskonale szare), istotna jest relacja pomiędzy temperaturą tego ciała i temperaturą absorbującego gazu. Jak już wspomniano przy omawianiu wzoru (1), na podstawie rozważań zawartych między innymi w pracach [3, 4] można przyjąć, że promieniowanie termiczne z ciał o temperaturze zbliżonej do temperatury powietrza, pomimo oddziaływania z rozpuszczonymi w nim gazami, nie zmienia swojego natężenia. W związku z tym w rozważaniach jako źródło promieniowania przyjęto ciało doskonale czarne o temperaturze znacznie wyższej od temperatury powietrza, wynoszącej 383 K. Przyjęto ją również ze względu na warunki eksperymentu omówionego w dalszej części pracy. Widmo takiego promieniowania przed przejściem i po przejściu przez warstwę powietrza o parametrach podanych przy opisie rysunku 2 przedstawiono na rysunku 3. Przedstawione widmo otrzymano, mnożąc dla określonych liczb falowych wartość natężenia promieniowania termicznego przyjętego ciała doskonale czarnego przez transmisję odczytaną z wykresu na rysunku 2. Oczywiście jest, że promieniowanie o takim widmie będzie słabiej oddziaływać z parami i gazami, których pasma absorpcyjne będą się pokrywały z lokalnymi minimami w przedstawionym widmie. Jednak często, zwłaszcza w artykułach popularnonaukowych, sugeruje się, że pokazany efekt nie ma większego znaczenia, wskazując na zjawisko, które ten efekt zmniejsza. Polega ono na rosnącej roli „skrzydeł” w liniach oscylacyjno-rotacyjnych o kształcie lorentzowskim dla wielu gazowych substancji absorpcyjnych, których widmo ma strukturę liniową [5, 6].



Rys. 3. Przybliżona postać widma promieniowania z ciała doskonale czarnego o temperaturze 383 K po przejściu przez warstwę powietrza o grubości 10 m, temperaturze $T = 300$ K przy 50% wilgotności i zawartości 380 p.p.m. CO₂; linią przerywaną przedstawiono widmo promieniowania wyjściowego

Przy nasycaniu części centralnej linia się poszerza, powodując dalszy wzrost absorpcji promieniowania. Jednak wpływ każdego z tych zjawisk może być różny, a poza tym odstępów częstotliwościowe pomiędzy liniami są ograniczone i dla dostatecznie dużej absorpcji linie zaczną na siebie „zachodzić”. Dokładna analiza tych zjawisk została przedstawiona w pracy [5], w której pokazano, że absorpcję promieniowania w gazie można opisać wzorem:

$$A = C + D \ln(m) + K \ln(p), \quad (2)$$

gdzie: C , D i K — stałe określane empirycznie,
 m — masa substancji absorbującej,
 p — ciśnienie.

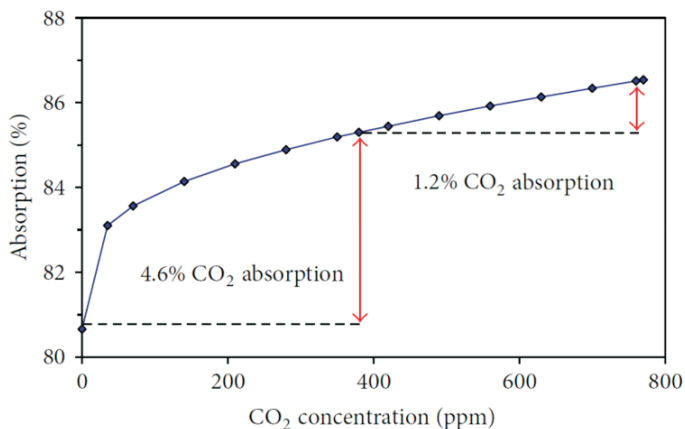
Zapisany wzór ma postać bardzo ogólną. Widać z niego, że absorpcja zależy od masy absorbującej (od stężenia) w sposób logarytmiczny. Tym samym wpływ wzrostu stężenia gazu absorbującego na wzrost absorpcji promieniowania zależy od stężenia wyjściowego.

Obszerna analiza numeryczna, którą przeprowadził prof. Harde [6, 17], daje wynik konkretny przedstawiony na rysunku 4.

Widać z niego, że w atmosferze dwutlenek węgla o stężeniu 380 ppm CO₂ odpowiada za 4,6% absorpcji promieniowania termicznego Ziemi. Natomiast podwojenie tego stężenia do wartości 760 ppm zwiększy absorpcję jedynie o 1,2%.

Wyniki tej pracy nie pokrywają się z wynikami innych prac, o czym wspomina sam autor. Przy złożoności wykorzystywanych modeli komputerowych istnieje wiele kontrowersji wobec wyników zarówno tych przedstawionych, jak i wielu innych prac.

Składania to do zwrócenia większej uwagi na weryfikację eksperymentalną stawianych tez oraz wyników obliczeń teoretycznych.

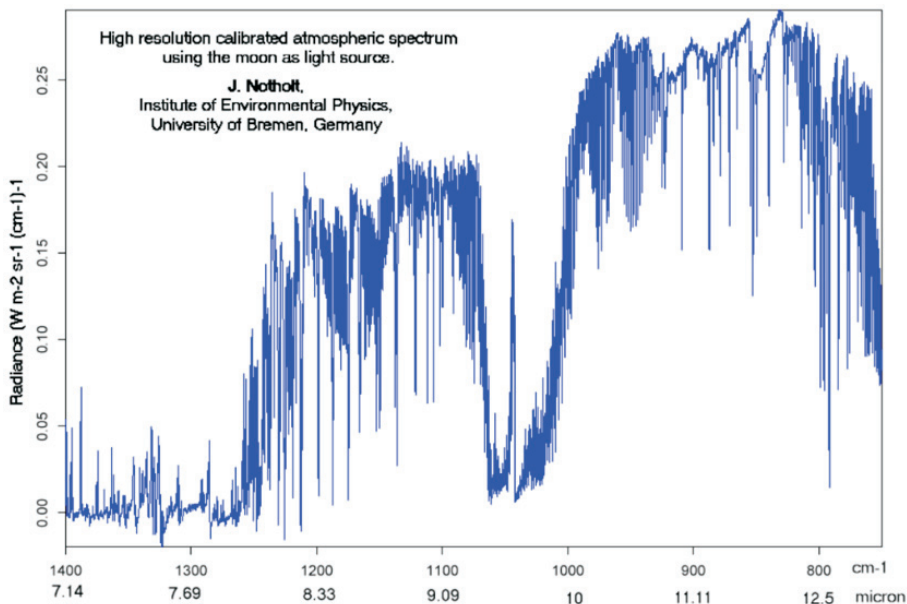


Rys. 4. Absorpcja promieniowania ziemskiego w funkcji stężenia CO₂ [6]

3. Możliwości wykorzystania promieniowania podczerwonego z Księżyca do badań atmosfery

Badanie widma transmisyjnego atmosfery na małych odległościach, zwłaszcza w poziomie, wydaje się być ideowo stosunkowo proste. Wystarczy w odpowiedniej odległości od siebie ustawić promiennik (rozgrzane ciało) i monochromator z fotodetektorem, by dokonać takiego pomiaru. Jednak, biorąc pod uwagę możliwość zmiany poszczególnych parametrów atmosfery wraz z jej wysokością, ciekawsze stają się zagadnienia związane z badaniami pionowymi. Ma to oczywiście szczególne znaczenie przy analizie zjawisk dotyczących pochłaniania promieniowania termicznego emitowanego przez litosferę Ziemi i związanego z tym efektu cieplarnianego. Do takich badań można wykorzystać sztuczne satelity, chociaż prościej użyć satelitę naturalnego — Księżyca. Temperatura powierzchni Księżyca jest bardzo zróżnicowana, ale dla części oświetlonej przez Słońce, według informacji encyklopedycznych, może nieznacznie przekraczać 110°C. Jest więc znacznie wyższa od temperatury atmosfery ziemskiej. Dzięki temu promieniowanie termiczne Księżyca, wzmocnione odbitym od niego promieniowaniem podczerwonym Słońca, jest absorbowane we wszystkich warstwach atmosfery. Wynika to z faktu, że przy dostatecznie dużym przewyższeniu temperatury źródła nad temperaturą oddziałującego gazu wielkość $B_\nu(T)$ w równaniu (1) nie ma istotnego znaczenia.

Zagadnienie wykorzystania promieniowania Księżyca do badań atmosfery ziemskiej nie jest nowe. Już pod koniec dziewiętnastego wieku w pracy [18] przedstawiono wyniki badań widma promieniowania podczerwonego z Księżyca po przejściu przez atmosferę ziemską. Dokładniejsze wyniki badań zaprezentowane w pracy [19] pokazano na rysunku 5. Widać na nim pasma absorpcyjne odpowiadające różnym gazom czynnym w atmosferze ziemskiej.



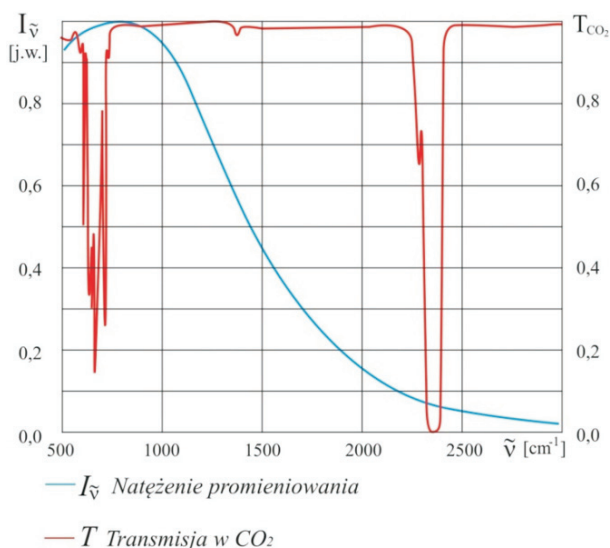
Rys. 5. Widmo promieniowania podczerwonego z Księżyca po przejściu przez atmosferę ziemską [18]

Obecnie Księżyc jest również wykorzystywany w wielu pracach eksperymentalnych do diagnozowania atmosfery ziemskiej [20], [21]. Pozwalają one poprzez badanie widma badać w niej rozmaite procesy i lepiej ją poznawać.

Rozważane promieniowanie podczerwone z Księżyca jest absorbowane w atmosferze między innymi przez rozpuszczony dwutlenek węgla. Interesujące jest zatem przedstawione na rysunku 6 zestawienie widma promieniowania emitowanego przez ciało doskonale czarne o temperaturze 383 K (110°C) z widmem transmisyjnym CO₂ w zakresie pokrywania się obydwu widm.

Widmo transmisyjne CO₂ zostało wykonane przy pomocy programu HITRAN 2004; dla $L = 10$ cm; $p = 1013$ mbar; $T = 296$ K. Widać, że w obszarze ~ 670 cm⁻¹ pasmo absorpcyjne CO₂ występuje w pobliżu maksymalnej gęstości spektralnej emitowanego promieniowania. W rozważaniach należy również uwzględnić fakt, że powierzchnia Księżyca jest ogrzewana promieniowaniem słonecznym o rozkładzie widma odpowiadającym ciału doskonale czarnemu o temperaturze ponad 5000°K.

Część tego promieniowania odbije się od powierzchni Księżyca i wraz z emitowanym przez niego promieniowaniem termicznym będzie się propagować w kierunku Ziemi. Widmo połączonego promieniowania będzie miało oczywiście nadal ciągły charakter, przy czym ze względu na wysoką temperaturę Słońca maksimum widma powinno się przesunąć w kierunku fal krótszych, nachodząc bardziej na najsilniejsze pasmo absorpcyjne $4,3 \mu\text{m}$ (2326 cm^{-1}) CO_2 . Tym samym promieniowanie podczerwone od Księżyca powinno być bardziej osłabiane przez dwutlenek węgla niż promieniowanie emitowane przez ciało doskonale czarne o temperaturze 110°C .

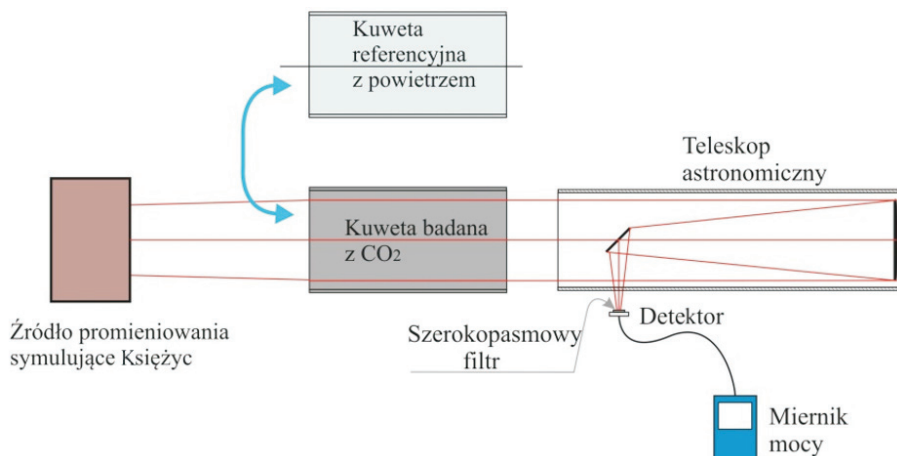


Rys. 6. Zestawienie rozkładu radiancji ciała doskonale czarnego o temperaturze 383 K z widmem transmisyjnym CO_2

4. Prace eksperymentalne

Jak już wspomniano we wstępie, w pracy starano się określić wpływ wzrostu stężenia substancji absorbującej w atmosferze na wzrost absorpcji przechodzącego przez nią promieniowania termicznego. W związku z tym przeprowadzono eksperyment z wykorzystaniem promieniowania podczerwonego z Księżyca. Zakładając, że każdy z gazów absorbujących promieniowanie w atmosferze oddziałuje z przechodzącym promieniowaniem niezależnie od innych gazów, wzrost stężenia gazu absorbującego w atmosferze zastąpiono wstawieniem w tor przechodzącego promieniowania odpowiedniej kuwety z tym gazem. Eksperyment przeprowadzono w dwóch częściach.

W pierwszej części zrealizowanej w pomieszczeniu laboratoryjnym wykorzystano układ zestawiony według schematu przedstawionego na rysunku 7.



Rys. 7. Schemat układu do pomiaru transmisji promieniowania podczerwonego w kuwecie z CO₂

W układzie tym, wykorzystującym sztuczne źródło promieniowania symulujące Księżyc, prześwietlano przemiennie dwie jednakowe kuwety w postaci rur z pleksi o średnicy 250 mm i długości 500 mm zamkniętych oknami z folii polietylenowej. Jedna kuweta napełniona była dwutlenkiem węgla, natomiast druga, wykorzystywana jako kuweta referencyjna, powietrzem. Promieniowanie, po przejściu przez kuwetę, było skupiane przez teleskop astronomiczny Soligor MT-800/8"E na głowicy pomiarowej S401C miernika mocy PM200 firmy THORLABS. Podstawowe parametry teleskopu to: $D = 200$ mm, $F = 800$ mm, średnica przysłaniania przez zwierciadło wyprowadzające wiązkę $d = 60$ mm. Powierzchnia czynna głowicy pomiarowej przysłonięta była szerokopasmowym filtrem w postaci płasko-równoległej płytki germanowej.

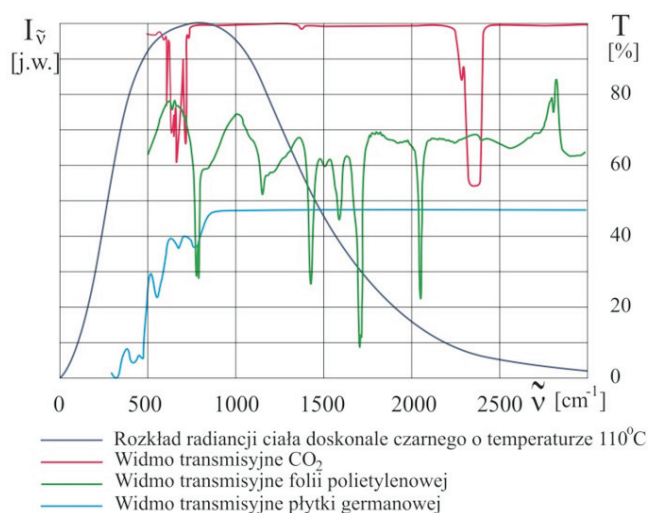
Okna z folii polietylenowej i filtr w postaci płasko-równoległej płytki germanowej wybrano ze względu na ich charakterystyki transmisyjne wykonane na spektrometrze.

Zestawienie tych widm z widmem transmisyjnym dwutlenku węgla i widmem emisyjnym ciała doskonale czarnego o temperaturze 110°C (odpowiadającej temperaturze Księżyc), przedstawiono na rysunku 8.

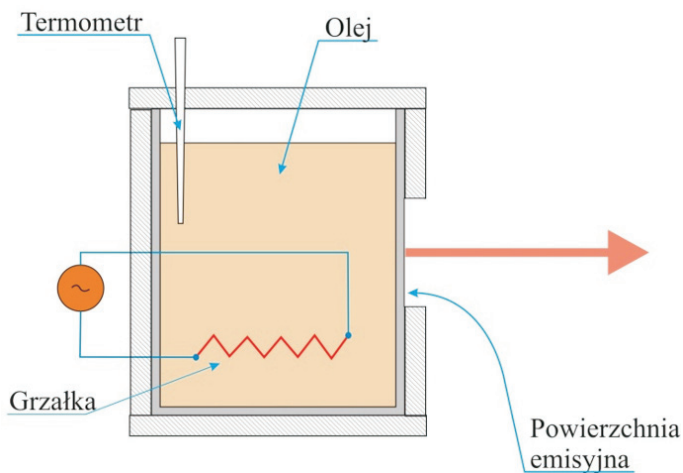
Widać na nim, że z widma podczerwonego emitowanego przez ciało doskonale czarne o temperaturze 110°C płytka germanowa wycina nieinteresującą nas część promieniowania o niskich częstotliwościach i nieco zmniejsza promieniowanie o długości fal ~ 15 μm (666 cm^{-1}) absorbowane przez CO₂. Z kolei folia polietylenowa wycina z tego widma pasma niepokrywające się z pasmami absorpcyjnymi CO₂.

Dzięki temu należy się spodziewać, że opisany układ pomiarowy, dzięki wykorzystaniu widma lepiej dopasowanego do pasma absorpcji CO_2 , powinien bardziej eksponować absorpcję wykorzystywanego promieniowania w dwutlenku węgla.

Wspomnianym źródłem promieniowania, symulującym Księżyc, był zestaw przedstawiony na rysunku 9.



Rys. 8. Zestawienie widm transmisyjnych materiałów w układzie pomiarowym z widmem radiacji ciała doskonale czarnego o temperaturze 110°C



Rys. 9. Źródło promieniowania podczerwonego do badań laboratoryjnych

Składał się on ze szklanego okrągłego naczynia o średnicy 100 mm i wysokości 150 mm napełnionego olejem mineralnym. Naczynie było zaizolowane cieplnie pianką poliuretanową o grubości 10 mm z otworem o średnicy 40 mm dla emitowanego promieniowania. Przy pomocy zanurzonej w oleju grzałki elektrycznej olej ten był podgrzewany do temperatury 110°C. Temperaturę mierzono termometrem elektronicznym ETI 810-930 firmy MERA z dokładnością 0,1°C. Źródło promieniowania zostało ustawione w odległości 50 cm od polietylenowego okna kuwety układu badawczego przedstawionego na schemacie (rys. 7). Po zasłonięciu źródła promieniowania płytką ze sklejk (temperatura ~20°C) miernik mocy promieniowania został wyzerowany.

Na podstawie 50 odczytów przeprowadzanych co 0,01 sekundy miernik określał średnią moc promieniowania dla przedziałów czasowych 0,5 s. Następnie dla tak wykonanych dziesięciu kolejnych pomiarów w ciągu pięciu sekund została określona moc średnia. Dla każdego ustawienia kuwety wykonywano po trzy pomiary, po czym zamieniano kuwety i pomiary powtarzano. Wyniki pomiarów przedstawiono w tabeli 1. Z przedstawionych pomiarów wynika, że moc promieniowania padającego na głowicę miernika wynosi w przypadku kuwety z powietrzem $I_p = 309,2 \mu\text{W}$, natomiast dla kuwety z CO₂: $I_{\text{CO}_2} = 264,6 \mu\text{W}$.

TABELA 1

Moc promieniowania podczerwonego ze źródła referencyjnego po przejściu przez odpowiednią kuwetę

Kolejne ustawienie	Moc promieniowania dla kuwety z CO ₂ [μW]	Kolejne ustawienie	Moc promieniowania dla kuwety z powietrzem [μW]
1	267,2	2	310,4
	265,1		309,4
	263,7		308,5
3	264,6	4	309,2
	263,2		310,1
	262,9		308,9
5	264,2	6	307,9
	266,7		310,1
	263,9		308,7
Wartość średnia	264,6	Wartość średnia	309,2

Przyjmując, że moc promieniowania padającego na pierwsze okno kuwety wynosi I_0 , wartość mocy promieniowania padającego na głowicę miernika można wyrazić przez przedstawione poniżej wzory, odpowiednio dla kuwety z dwutlenkiem węgla i z powietrzem:

$$I_{CO_2} = I_0 \cdot T_{ok}^2 \cdot T_{CO_2} \cdot T_L \cdot T_F, \quad (3)$$

$$I_p = I_0 \cdot T_{ok}^2 \cdot T_p \cdot T_L \cdot T_F, \quad (4)$$

gdzie: T_{ok} — transmisja promieniowania dla polietylenowego okna,
 T_L — transmisja promieniowania dla lunety,
 T_F — transmisja promieniowania dla filtru germanowego,
 T_{CO_2} — transmisja promieniowania dla dwutlenku węgla w kuwecie,
 T_p — transmisja promieniowania dla powietrza w kuwecie.

Na podstawie (3) i (4), przyjmując, że $T_p = 1$, otrzymamy:

$$T_{CO_2} = \frac{I_{CO_2}}{I_p}. \quad (5)$$

Wstawiając do wzoru (5) odpowiednie zmierzone wartości z tabeli 1, otrzymujemy wartość transmisji promieniowania w umieszczonym w kuwecie dwutlenku węgla pod ciśnieniem atmosferycznym o temperaturze 20°C i grubości 50 cm: $T_{CO_2} = 0,86$.

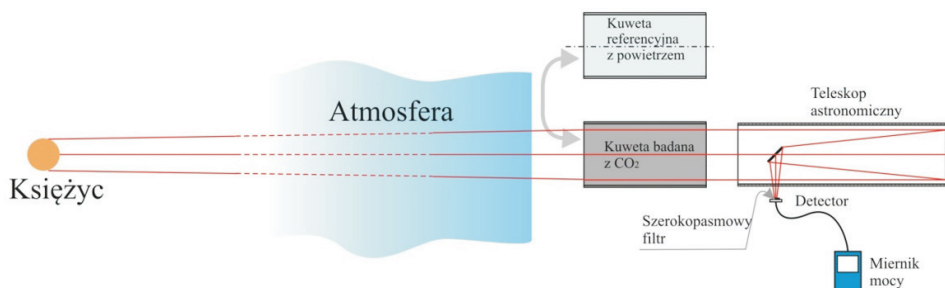
Należy podkreślić, że promieniowanie to było emitowane przez ciało szare (zmatowiona powierzchnia szkła) o temperaturze 110°C i przechodziło przez dwa okna z folii polietylenowej oraz filtr z płytki germanowej, natomiast nie przechodziło przez grubą warstwę atmosfery ziemskiej.

Druga zasadnicza część eksperymentu miała na celu pomiar transmisji promieniowania z Księżyca po przejściu przez atmosferę ziemską, w dwutlenku węgla w tej samej kuwecie co w pierwszej części eksperymentu. W związku z tym zmontowano mobilny zestaw pomiarowy odpowiadający opisanemu zestawowi laboratoryjnemu przedstawionemu na rysunku 9 (bez źródła promieniowania). Widok tego zestawu pokazano na rysunku 10.

Zestaw został zmontowany na statywie z głowicą umożliwiającą obrót w osi pionowej o pełny kąt i w osi poziomej od zera do dziewięćdziesięciu stopni. Zasadniczy eksperyment z wykorzystaniem przedstawionego zestawu został przeprowadzony na tarasie budynku w nocy, przy bezchmurnej pogodzie, w czasie pełni Księżyca, przy temperaturze ~2°C. Jego schemat pokazano na rysunku 11.



Rys. 10. Widok mobilnego zestawu pomiarowego do pomiaru transmisji promieniowania podczerwonego z Księżyca w dwutlenku węgla



Rys. 11. Schemat układu eksperymentalnego do pomiaru transmisji promieniowania podczerwonego z Księżyca w dwutlenku węgla

Przy ustawionej osi optycznej układu w kierunku czystego nieba (z dala od tarczy Księżyca) został wyzerowany miernik mocy, a następnie, po skierowaniu tej osi w środek tarczy, mierzono moc promieniowania padającego na głowicę miernika. W czasie pomiaru oś układu optycznego kuwety i lunety, skierowana na środek tarczy Księżyca, była odchylna od pionu o kąt $\sim 35^\circ$. Zamieniając kuwety z dwutlenkiem węgla i powietrzem (jak poprzednio w laboratorium), mierzono moc promieniowania z Księżyca po przejściu przez każdą z nich.

Analogicznie jak w części pierwszej eksperymentu odczytywano wyniki pomiarów i umieszczano je w tabeli 2.

TABELA 2

Moc promieniowania podczerwonego z Księżyca po przejściu przez odpowiednią kувetę

Kolejne ustawienie	Moc promieniowania dla kувety z CO ₂ [μ W]	Kolejne ustawienie	Moc promieniowania dla kувety z powietrzem [μ W]
1	123,2	2	122,4
	121,7		123,1
	119,5		120,0
3	120,7	4	119,4
	122,1		121,3
	119,5		122,0
5	121,5	6	120,8
	119,1		118,3
	120,7		122,1
Wartość średnia	120,9	Wartość średnia	121,0

Otrzymane wyniki pokazują, że średnia wartość mocy promieniowania z Księżyca, po przejściu przez kувetę z dwutlenkiem węgla i kувetę z powietrzem, jest tym razem praktycznie taka sama. Oznacza to, że zgodnie ze wzorem (5) wartość transmisji promieniowania w dwutlenku węgla wynosi $T_{\text{CO}_2} \cong 1$. Należy się oczywiście odnieść do różnicy temperatur w pomieszczeniu ($T = 20^\circ\text{C}$) i na tarasie ($T = 2^\circ\text{C}$). Otóż, zgodnie z równaniem Schwarzschilda (1) i rozważaniami dotyczącymi absorpcji rezonansowej w gazach [6], w niższej temperaturze powinniśmy się spodziewać silniejszego osłabiania promieniowania w gazowym ośrodku absorpcyjnym niż w temperaturze wyższej. Tym samym zmiana temperatury nie mogła spowodować wzrostu transmisji promieniowania w CO₂.

5. Podsumowanie wyników prac eksperymentalnych

Zaprojektowany i przeprowadzony eksperyment posiada zarówno wartość metodologiczną, jak i poznawczą. Pokazano w nim stosunkowo prosty sposób pomiaru wielkości tłumienia promieniowania emitowanego przez ciało szare o zmodyfikowanym widmie przy przejściu przez konkretny gaz o określonej grubości warstwy oraz określonych temperaturze i ciśnieniu. Przeprowadzono również konkretne pomiary z wykorzystaniem promieniowania podczerwonego z Księżyca. Ich wyniki można zinterpretować następująco. Promieniowanie podczerwone, po dotarciu do powierzchni Ziemi, w wyniku absorpcji przez różne gazy rozpuszczone w atmosferze, zwłaszcza przez CO₂ i parę wodną, zmienia swoje widmo. Powstają w nim pokazane na rysunku 1 „zagłębienia”. Pasma absorpcyjne prześwietlanego dwutlenku węgla

pokrywają się z tymi „zagłębieniami”. Ostatecznym efektem tego jest zmniejszenie absorpcji promieniowania w prześwietlanej warstwie gazu. Oczywiście można dyskutować, czy zjawisko to można nazywać nasyceniem stężenia CO₂. Wiadomo bowiem, że wskutek nakładania się pasm absorpcyjnych uczestniczą w nim również inne gazy. Jednak najistotniejsze jest to, że w przeciwieństwie do pomiarów w laboratorium dodatkowa warstwa CO₂ nie zmniejsza w sposób zauważalny strumienia promieniowania podczerwonego z Księżyca.

Zaprezentowana praca pozwala nieco szerzej spojrzeć na obraz często przedstawianej rzeczywistości, w którym niekiedy demonizuje się rolę „skrzydeł” w liniach oscylacyjno-rotacyjnych przy wzroście stężenia gazu absorpcyjnego. Padają często stwierdzenia, że zawsze wzrost stężenia gazu absorpcyjnego, niezależnie od stanu wyjściowego, będzie powodował dalsze silne zwiększanie absorpcji promieniowania. Tymczasem otrzymane wyniki eksperymentalne obalają to ogólne twierdzenie. Wydaje się więc, że obserwując kamerą termowizyjną odległe tereny nad obszarami o zwiększonej zawartości CO₂ w powietrzu, nie musimy mieć pogorszenia obrazu (o ile nie będzie temu towarzyszyć zwiększenie zawartości pyłów i aerozoli).

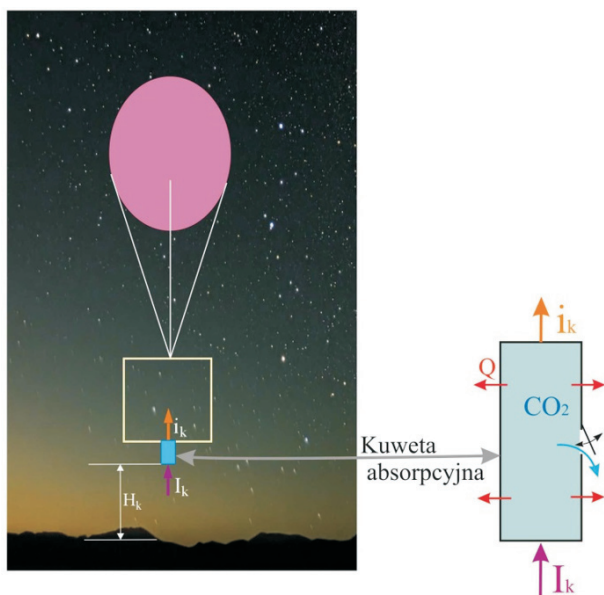
Powstaje oczywiście podstawowe pytanie, jak mają się otrzymane wyniki eksperymentalne do omawianego efektu cieplarnianego CO₂. Wykonano bowiem pomiar transmisji promieniowania podczerwonego z Księżyca, a nie z Ziemi, wiedząc, że istnieją poważne różnice w tych kwestiach. Wiadomo bowiem, że temperatura Ziemi jest dużo niższa niż Księżyca. W związku z tym widmo emisyjne Ziemi jest nieco przesunięte w kierunku fal dłuższych. Ponadto w przeciwieństwie do promieniowania z Księżyca absorbowanego w całej atmosferze zauważalne osłabianie promieniowania z Ziemi będzie zachodziło jedynie w zimniejszych warstwach atmosfery położonych na większych wysokościach. Wydawać by się więc mogło, że wartość poznawcza eksperymentu w tej kwestii jest niewielka i nie ma większego znaczenia praktycznego. Jednak przedstawiony argument w postaci obalenia mitu o niemożliwości nasycenia absorpcji promieniowania przy wzroście stężenia substancji absorbującej pozwala szerzej spojrzeć na efekt cieplarniany CO₂. Ponadto w eksperymencie została sprawdzona prosta metodologia, którą po odpowiedniej adaptacji można wykorzystać również w badaniach nad wzrostem absorpcji promieniowania termicznego Ziemi przy wzroście aktualnego stężenia CO₂ w atmosferze.

6. Propozycja dalszych badań

Zgodnie z równaniem Schwarzschilda (1), w związku z różnymi wartościami temperatury na różnych wysokościach, promieniowanie termiczne Ziemi będzie tam odmiennie osłabiane. Jak pokazano w cytowanej literaturze [5, 6, 17], dokładne opisy zjawiska są stosunkowo złożone, a autorzy pracy [5] mówią wprost o potrzebie eksperymentalnego wyznaczenia wykorzystywanych współczynników.

Istnieje również duża niepewność dotycząca wartości stężenia par i gazów absorbujących promieniowanie na różnych wysokościach.

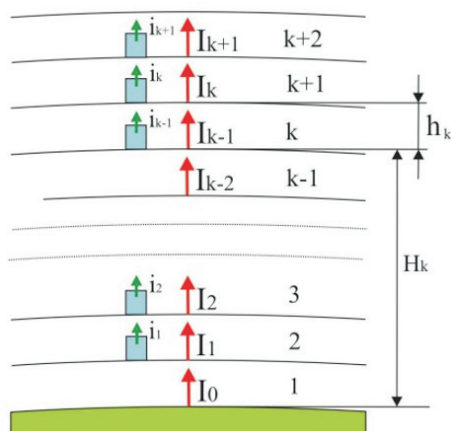
W związku z tym konieczne jest prowadzenie dokładnych pomiarów na wszystkich wysokościach, gdzie mamy do czynienia z zauważalną absorpcją promieniowania. Do takich eksperymentów można by wykorzystać odpowiedni balon wynoszący aparaturę pomiarową na żądaną wysokość bez poważniejszych zakłóceń turbulencyjnych atmosfery w pobliżu miejsca pomiaru. Poglądowy rysunek proponowanego eksperymentu przedstawiono na rysunku 12.



Rys. 12. Schemat układu do badań procesu nasycenia transmisji promieniowania termicznego Ziemi w CO_2

Do badań proponuje się użycie kuwet podobnych do wykorzystywanych w przeprowadzonym eksperymencie, ale mających możliwość stosunkowo szybkiego oddawania ciepła i zaopatrzonych w odpowiedni zawór zwrotny, aby temperatura i ciśnienie wewnątrz kuwety były zbliżone do temperatury i ciśnienia na zewnątrz. Należałoby również w proponowanym eksperymencie wykorzystać dwie identyczne kuwety: jedną napełnioną dwutlenkiem węgla, drugą referencyjną — powietrzem. Zrzucając odpowiednie porcje balastu, balon powinien osiągać swoje położenia w kolejnych strefach na wysokościach H_k (rys. 13).

W każdej z nich byłyby zmierzone natężenie promieniowania termicznego I_k oświetlające od dołu sprawdzaną kuwetę oraz natężenie promieniowania i_k nad tą kuwetą.



Rys. 13. Schematyczne przedstawienie pomiarów w poszczególnych strefach

Analizując interesujące nas zjawiska w poszczególnych strefach, widzimy, że strumień promieniowania emitowanego przez litosferę I_0 po przejściu przez pierwszą strefę wynosi:

$$I_1 = I_0 \cdot T_1. \quad (6)$$

A po przejściu przez k -tą strefę:

$$I_k = I_{k-1} \cdot T_k, \quad (7)$$

gdzie: T_1, T_k — transmisja promieniowania w odpowiednich strefach.

Mierząc w poszczególnych strefach k natężenie promieniowania $i_{CO_2}^k$ nad kuwetą z dwutlenkiem węgla i i_p^k nad kuwetą referencyjną, możemy korzystając z wzoru (5), określić transmisję promieniowania dla dwutlenku węgla w kuwecie w kolejnej strefie k (o ciśnieniu i temperaturze odpowiadającym tej strefie).

$$T_{CO_2}^k = \frac{i_{CO_2}^k}{i_p^k}. \quad (8)$$

Zakładając, że promieniowanie oddziałuje z molekułami CO₂ niezależnie od innych molekuł, można przyjąć hipotetyczną sytuację, gdy dwutlenek węgla zamiast w kuwecie jest rozłożony równomiernie w całej k -tej strefie poprzez zwiększenie jego stężenia. Znając grubość tej strefy oraz długość kuwety z dwutlenkiem węgla, można w prosty sposób określić to stężenie. Następnie przyjmując określoną dla tej strefy zależność transmisji promieniowania termicznego od stężenia CO₂,

można określić transmisję każdej strefy dla dowolnego stężenia dwutlenku węgla. Mnożąc z kolei transmisję dla wszystkich stref przez siebie, możemy obliczyć transmisję promieniowania termicznego od litosfery lub hydrosfery w całej atmosferze w miejscu przeprowadzenia eksperymentu. Oczywiście problemem jest znajomość wspomnianej zależności transmisji promieniowania termicznego od stężenia CO₂ w rozpatrywanej strefie. Dla niewielkiego przedziału zmian tego stężenia można przyjmować zależność liniową, dla nieco większych eksponencjalną (jak w prawie Lamberta–Beera), dla jeszcze większych zmian potrzebne są dokładniejsze obliczenia numeryczne uwzględniające wielkości wykorzystywane w równaniu Schwarzschilda. Dokładność otrzymanych wyników można byłoby zwiększyć poprzez wykorzystanie dodatkowych kuwet z mieszaniną powietrza z dwutlenkiem węgla o określonym stężeniu. Pozwoliłoby to na ewentualną korektę wspomnianej zależności transmisji promieniowania termicznego od stężenia CO₂.

Ostatecznie należy stwierdzić, że w przypadku przeprowadzenia eksperymentu w sposób „oszczędny” i przy uproszczonej obróbce wyników pomiarów nie będzie można przesądzić o istnieniu efektu cieplarnianego i jego wielkości. Jeżeli jednak przeprowadzimy eksperyment w sposób profesjonalny, przy dokładnych pomiarach i wykorzystaniu wspomnianych dodatkowych kuwet z mieszaniną CO₂ z powietrzem oraz z użyciem dokładnej analizy numerycznej wykorzystującej wyniki pomiarów i uwzględniającej wszystkie istotne czynniki występujące w eksperymencie, to na tej podstawie będzie możliwe określenie zależności transmisji całej atmosfery w miejscu eksperymentu od stężenia dwutlenku węgla w tej atmosferze. Przeprowadzając z kolei podobne pomiary w różnych częściach globu, będzie można na podstawie otrzymanych wyników w sposób wiarygodny określić z dużą dokładnością między innymi wrażliwość klimatyczną na dwutlenek węgla.

Zakończenie

Analizując poważniejsze publikacje dotyczące zmian klimatycznych, można zauważyć, że podstawowym narzędziem służącym lepszemu zrozumieniu tego, jak działa klimat Ziemi, jak zmieniał się w niedalekiej i odległej przeszłości i jak może się zmieniać w przyszłości, są komputerowe modele klimatu. Jednak w każdym modelu komputerowym, oprócz dobrego sprzętu i dobrych programów, potrzebne są jeszcze wiarygodne dane wejściowe. Konieczne są w związku z tym precyzyjne pomiary rozmaitych wielkości fizycznych na obszernych, często trudnodostępnych przestrzeniach. Dodatkowym problemem jest duża dynamika rozpatrywanych zjawisk atmosferycznych. Dlatego też nie mogą dziwić zasygnalizowane w rozdziale 2 rozbieżności wyników w różnych pracach. W związku z tym naturalna wydaje się potrzeba eksperymentalnej weryfikacji wyników obliczeń komputerowych na każdym etapie ich realizacji. Wykonana praca i przedstawiona propozycja kontynuowania

badań są odpowiedzią na te wyzwania. Oczywiście zarówno przy projektowaniu eksperymentów, jak i przy opracowywaniu wyników pomiarów nie możemy zapominać o potrzebie wykorzystywania w tych pracach programów komputerowych.

Źródło finansowania pracy — działalność statutowa Wojskowej Akademii Technicznej.

Artykuł wpłynął do redakcji 8.07.2020 r. Zatwierdzono do publikacji 11.09.2020 r.

Jan Kubicki <https://orcid.org/0000-0002-5191-7850>

Krzysztof Kopczyński <https://orcid.org/0000-0002-3319-3940>

Jarosław Młyńczak <https://orcid.org/0000-0002-0823-9302>

LITERATURA

- [1] KUBICKI J., KOPCZYŃSKI K., MŁYŃCZAK J., *Saturation of the absorption of thermal radiation by atmospheric carbon dioxide*, IAPGOŚ, 1, 2020, 77-81.
- [2] ANDREWS D.G., *An Introduction to Atmospheric Physics*, Cambridge University Press, 2010.
- [3] HOUGHTON J.T., *The Physics of Atmospheres*, Cambridge University Press, Cambridge 3rd Edition, 2002.
- [4] JACOBSON M.Z., *Fundamentals of Atmospheric Modeling*, Cambridge University Press, 2005.
- [5] GOODY R.M., YUNG Y.L., *Atmospheric Radiation: Theoretical Basis*, New York, NY: Oxford University Press, 1989.
- [6] HARDE H., *Radiation and Heat Transfer in the Atmosphere: A Comprehensive Approach on a Molecular Basis*, International Journal of Atmospheric Sciences, vol. 2013, Article ID 503727, 26 pages, <http://dx.doi.org/10.1155/2013/503727>.
- [7] AL NABOULSI M., SIZUN H., DE FORNEL F., *Fog Attenuation Prediction for Optical and Infrared Waves*, Journal SPIE, International Society for Optical Engineering, 2003.
- [8] CARBONNEAU T.H., WISELY D.R., *Opportunities and challenges for optical wireless; the competitive advantage of free space telecommunications links in today's crowded market place*, SPIE Conference on optical wireless communications, Boston, Massachusetts, vol. 3232, 1998.
- [9] WILFERT O., HENNIGER H., KOLKA Z., *Optical communication in free space*, Proc. SPIE 7141, 16th Polish–Slovak–Czech Optical Conference on Wave and Quantum Aspects of Contemporary Optics, 714102 (20 November 2008).
- [10] MINKINA W., KLECHA D., *Atmospheric transmission coefficient modelling in the infrared for thermovision measurements*, J. Sens. Sens. Syst., 5, 2016, 17-23.
- [11] VOLLMER M., MOLLMANN K., *Infrared Thermal Imaging*, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. Second Edition, 2018, s. 53.
- [12] VOLOKIN D., RELLEZ L., *On the average temperature of airless spherical bodies and the magnitude of Earth's atmospheric thermal effect*, Springer Plus, 3, 723, 2014.
- [13] PIERREHUMBERT R., *Infrared radiation and planetary temperature*, Phys Today, 64, 2011, 33-38.
- [14] WILD M., FOLINI D., SCHÄR C., LOEB N., DUTTON E.G., et al. *The global energy balance from a surface perspective*, Clim Dyn, 40, 2013, 3107-3134.
- [15] MARKOWICZ K., *Procesy radiacyjne w atmosferze. Materiały do wykładu*, Instytut Geofizyki, Wydział Fizyki, Uniwersytet Warszawski, 2016, 53-56, <http://www.igf.fuw.edu.pl/~kmark/stacja/wyklady/ProcesyRadiacyjne/2016/WykladRadiacjaKlimat.pdf>

- [16] VOLLMER M., MOLLMANN K., *Infrared Thermal Imaging*, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. Second Edition, 2018, s. 53.
- [17] HARDE H., *Advanced Two-Layer Climate Model for the Assessment of Global Warming by CO₂*, Open Journal of Atmospheric and Climate Change, vol. 1, no. 3, November 2014, 2374-3794.
- [18] ARRHENIUS S., *On the influence of carbonic acid in the air upon the temperature of the ground*, The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science Series 5, 41 (251). 39 pages (April 1896), <http://empslocal.ex.ac.uk/people/staff/gv219/classics.d/Arrhenius96.pdf>
- [19] NOTHOLT J., Institute of Environmental Physics, University of Bremen, Germany, <http://members.casema.nl/errenwijlens/co2/arrhenius.html>
- [20] NOTHOLT J., *The Moon as a light source for FTIR measurements of stratospheric trace gases during the polar night: Application for HNO₃ in the Arctic*, Journal of Geophysical Research, vol. 99, no. D2, 3607-3614, February 20, 1994.
- [21] VOLLMER M., MÖLLMANN K., *Surface temperatures of the Moon: measurements with commercial infrared cameras*, European Journal of Physics, vol. 33, no. 6, 2012, 1703-1719.

J. KUBICKI, K. KOPCZYŃSKI, J. MŁYŃCZAK

Influence of increased CO₂ concentration in the atmosphere on the process of thermal radiation absorption

Abstract. The paper presents the problem of the influence of the increase in the concentration of carbon dioxide in the atmosphere on the increase in the absorption of thermal radiation. Attention was paid to the differences in the results of calculations in the works of different authors. A simple measurement method has been worked out by means of which, using infrared radiation from the Moon, the possibility of saturation of the process of absorption of thermal radiation for CO₂ in the atmosphere has been confirmed. Next, a proposal was presented to conduct further experimental works enabling improvement and verification of computer climate models.

Keywords: radiation processes, Schwarzschild equation, greenhouse gases, thermal radiation absorption.

DOI: 10.5604/01.3001.0014.8870