LXIX OLIMPIADA FIZYCZNA

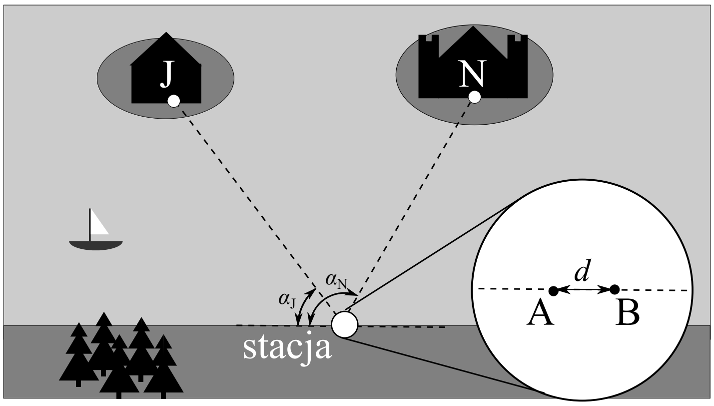
ZAWODY II STOPNIA

CZĘŚĆ TEORETYCZNA, 12.01.2020

Za każde zadanie można otrzymać maksymalnie 20 punktów.

Zadanie 1

Na brzegu rozległego jeziora umieszczono stację nadawczą, składającą się z dwóch anten – pionowych prętów – umieszczonych w punktach A oraz B odległych od siebie o d. Na jeziorze są dwie wysepki. Na pierwszej, w punkcie J, mieszka agent J.B., a na drugiej, w punkcie N, jest rezydencja złego doktora N. – patrz rysunek.



Rys. do zad. 1. Skala odległości nie jest zachowana.

Stacja nadawcza ma za zadanie przesyłać agentowi J. B. informacje, ale tak, by nie trafiły one do doktora N. Do anten jest doprowadzany harmoniczny sygnał (prąd); do tej w punkcie A o natężeniu $I_0 \sin(2\pi f t)$, do tej w punkcie B – o natężeniu $I_0 \sin(2\pi f t + \phi_0)$, gdzie t jest czasem, a I_0 (amplituda sygnału), f (częstotliwość sygnału) oraz ϕ_0 (różnica faz sygnałów) to stałe. Odległości JA oraz NA są znacznie większe od odległości między antenami d. Dla $f = 3 \cdot 10^8$ Hz, w następujących przypadkach:

a) $\alpha_\mathrm{J} = \sphericalangle\mathrm{ABJ} = 30^\circ$, $\alpha_\mathrm{N} = \sphericalangle\mathrm{ABN} = 140^\circ$, oraz

b) $\alpha_\mathrm{J} = \sphericalangle\mathrm{ABJ} = 75^\circ$, $\alpha_\mathrm{N} = \sphericalangle\mathrm{ABN} = 110^\circ$,

ustal, czy jest możliwy taki wybór odległości między antenami d oraz różnicy faz ϕ_0, aby jednocześnie spełnione były dwa warunki:

- natężenie fali wypadkowej jest maksymalne tylko w kierunku do agenta J.B. (czyli tylko w kierunku od anten do punktu J),
- natężenie fali wypadkowej jest równe zeru tylko w kierunku do doktora N. (czyli tylko w kierunku od anten do punktu N).

Jeśli taki wybór jest możliwy, to podaj także wartość d.

Rozważamy odbiór sygnału tylko w miejscach, których odległości od każdej z anten są dużo większe niż d, znajdujących się na jeziorze (na rysunku powyżej prostej wyznaczonej przez punkty AB). Pomiń krzywiznę Ziemi. Przyjmij, że prędkość fal radiowych wynosi $c = 3 \cdot 10^8$ m/s.

Zadanie 2

Do końca A pręta AB jest przymocowana cienka nić o długości l. Na drugim końcu nici jest przymocowana mała kulka o masie m. Pręt obracano ze stałą prędkością kątową wokół osi prostopadłej do pręta i przechodzącej przez jego koniec B. Moc wydatkowana do podtrzymania tego ruchu była równa P, a kulka poruszała się po okręgu o promieniu r. Siła oporu powietrza działająca na kulkę jest równa $F_\mathrm{r} = cv^2$, gdzie c jest znaną stałą, a v prędkością kulki.

a) Wyznacz długość pręta d.

b) Prędkość kątową obrotu pręta stopniowo zwiększono dwukrotnie. Wyznacz promień okręgu r', po jakim kulka będzie się poruszała w tej nowej sytuacji, oraz moc P' niezbędną do podtrzymania tego ruchu.

Pomiń grawitację. Pomiń też siły oporu powietrza działające na nić oraz na pręt.

Zadanie 3

Rozważmy szczelnie zamknięty zbiornik o pojemności V_0 (może to być np. szybkowar). We wnętrzu tego zbiornika znajduje się tylko woda o masie m_w oraz pozostająca z nią w równowadze para wodna.

Dla małych przyrostów ΔT ciśnienie pary $p(T)$ będącej w równowadze z wodą jest dane wzorem

$$p(T_0 + \Delta T) = p_0 + \alpha \Delta T,$$

gdzie p_0 oraz α są znanymi stałymi. W tym zadaniu rozważamy tylko nieujemne ΔT.

Ciepło właściwe wody wynosi c_w, molowe ciepło właściwe pary – c_V, molowe ciepło parowania wody – L, gęstość wody – ρ. Parę wodną traktujemy jak gaz doskonały. Należy uwzględnić, że gęstość wody jest znacznie większa od gęstości pary oraz pominąć rozszerzalność cieplną zbiornika i wody.

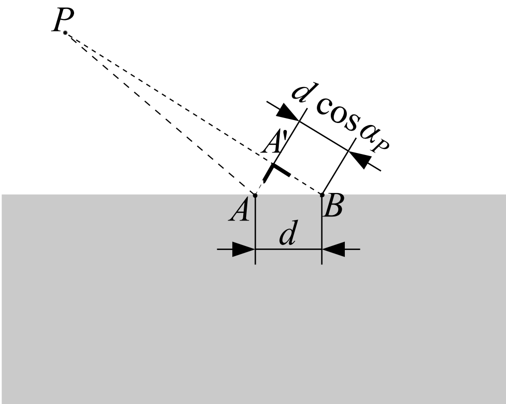
Wyznacz pojemność cieplną zawartości zbiornika w temperaturze T_0, tzn. wielkość $\Delta Q/\Delta T$, gdzie ΔQ jest ciepłem, jakie należy dostarczyć do wnętrza zbiornika, aby temperatura wody oraz pary wodnej w jego środku wzrosła o bardzo małą wartość ΔT.

Przyjmując $c_\mathrm{w} = 4\,200$ J/(kg·K), $c_\mathrm{V} = 34$ J/(mol·K), $L = 41\,000$ J/mol, $\rho = 1000$ kg/m^3, $\alpha = 3{,}6 \cdot 10^3$ Pa/K, $p_0 = 10^5$ Pa, $T_0 = 373$ K, wartość uniwersalnej stałej gazowej $R = 8{,}3$ J/(mol·K), $V_0 = 1$ m^3 podaj wynik liczbowy dla: a) $m_\mathrm{w} = 15$ kg, b) $m_\mathrm{w} = 2$ kg, oraz c) $m_\mathrm{w} = 0$ kg (w zbiorniku jest tylko para wodna o temperaturze T_0 i ciśnieniu p_0).

LXIX OLIMPIADA FIZYCZNA
ROZWIĄZANIA ZADAŃ ZAWODÓW II STOPNIA
CZĘŚĆ TEORETYCZNA

Rozwiązanie zadania 1

Rozważmy punkt P, którego odległość od anten jest znacznie większa od odległości między antenami ($\left|\overline{PB}\right| \ll d$, $\left|\overline{PA}\right| \ll d$).



Rysunek 1: $\alpha_P = \sphericalangle ABP$. Punkt A' to taki punkt na odcinku BP, że $\left|\overline{PA}\right| = \left|\overline{PA'}\right|$. Ponieważ $\left|\overline{PA}\right| \gg d$, kąt $\sphericalangle ABP$ jest mały, a zatem $\sphericalangle AA'B \approx 90^{o}$.

Dla takiego odległego punktu zachodzi (patrz rys. 1)

$$\left|\overline{PB}\right| - \overline{|PA|} = d\cos\alpha_P, \tag{1}$$

gdzie $\alpha_P = \sphericalangle$ABP. W konsekwencji w punkcie P różnica faz fal pochodzących od punktu B oraz od punktu A wynosi

$$\phi_P = 2\pi\frac{d}{\lambda}\cos\alpha_P - \phi_0, \tag{2}$$

gdzie

$$\lambda = \frac{c}{f}, \tag{3}$$

jest długością fali wysyłanej przez każdą z anten. Dla danych z treści zadania $\lambda = 1$ m.

Najpierw rozważymy kąty, dla których natężenie promieniowania jest maksymalne. Warto zaznaczyć, że przedstawiona dalej analiza upraszcza się nieco przy podstawieniu konkretnych wartości α_J i α_N z treści zadania, jednak dla zachowania ogólności w naszych rozważaniach nie będziemy się ograniczać do tych przypadków.

Natężenie fali odbieranej w punkcie P jest maksymalne, gdy zachodzi interferencja konstruktywna, tzn. gdy

$$\phi_P = 2\pi\frac{d}{\lambda}\cos\alpha_P - \phi_0 = 2\pi n, \quad n = 0,\ \pm 1,\ \pm 2,\ \ldots. \tag{4}$$

Ponieważ takie maksymalne natężenie ma być w punkcie J, otrzymujemy

$$\phi_0 = 2\pi\frac{d}{\lambda}\cos\alpha_J. \tag{5}$$

Powyżej przyjęliśmy $n = 0$, ponieważ kąty (przesunięcia fazowe) różniące się o 2π są sobie równoważne i nie prowadzi to do utraty ogólności. (Zauważmy jednak, że przy takim wyborze, przesunięcie fazowe ϕ_0 niekoniecznie jest z przedziału od 0 do 2π lub od $-\pi$ do π.)

Aby było jeszcze jedno maksimum, dla kąta różnego od α_J, musi zajść

$$2\pi\frac{d}{\lambda}\cos\alpha_P - 2\pi\frac{d}{\lambda}\cos\alpha_J = 2\pi n', \tag{6}$$

dla jakiegoś całkowitego i różnego od zera n'. Ponieważ $|\cos\alpha_P| \leqslant 1$, powyższy warunek nie będzie mógł być spełniony jeśli

$$\left|n'\frac{\lambda}{d} + \cos\alpha_J\right| > 1, \tag{7}$$

Ograniczając się do $n' = \pm 1$ (jeśli ten warunek będzie spełniony dla $n' = 1$ lub $n' = -1$, to będzie również spełniony dla $|n'| > 1$), otrzymujemy

$$\left|\frac{\lambda}{d} - |\cos\alpha_J|\right| > 1. \tag{8}$$

Ponieważ $|\cos\alpha_J| \leqslant 1$ a $\frac{\lambda}{d} > 0$, wystarczy rozważyć przypadek $\frac{\lambda}{d} > |\cos\alpha_J|$, co daje następujacy warunek na to, by występowało tylko jedno maksimum

$$\frac{d}{\lambda} < \frac{1}{1 + |\cos\alpha_J|}. \tag{9}$$

Teraz rozważymy kąty, dla których natężenie promieniowania jest równe zero.

Natężenie fali odbieranej w punkcie P będzie równe zeru, gdy zajdzie interferencja destruktywna, tzn. gdy

$$|\phi_P| = \pi + 2\pi n, \quad n = 0,\ 1,\ 2,\ \ldots, \tag{10}$$

czyli uwzględniając wyrażenie na ϕ_0

$$|\phi_P| = 2\pi\frac{d}{\lambda}\left|\cos\alpha_P - \cos\alpha_J\right| = \pi + 2\pi n. \tag{11}$$

Ten warunek ma być spełniony w punkcie N, zatem możemy wyznaczyć odległość miedzy antenami d jako

$$d = \frac{n_N + \frac{1}{2}}{|\cos\alpha_N - \cos\alpha_J|}\lambda, \tag{12}$$

gdzie $n_N = 0,\ 1,\ 2,\ \ldots$.

Jeśli kąt α_P, inny niż α_N, spełnia warunek (11), to zachodzi

$$2\pi\frac{d}{\lambda}\left(\cos\alpha_P - \cos\alpha_N\right) = 2\pi n',$$

gdzie n' jest całkowite i różne od zera.

Analogicznie jak w przypadku (6), warunkiem aby powyższe równanie nie miało rozwiązania jest

$$\frac{d}{\lambda} < \frac{1}{1 + |\cos\alpha_N|}. \tag{13}$$

Uwzględniając wzór (12) na d otrzymujemy

$$\frac{n_N + \frac{1}{2}}{|\cos\alpha_N - \cos\alpha_J|} < \frac{1}{1 + |\cos\alpha_N|}. \tag{14}$$

Ponieważ $|\cos\alpha_N - \cos\alpha_J| \leqslant 1 + |\cos\alpha_N|$, powyższe równanie może być spełnione tylko dla $n_N = 0$. Zatem ostateczny wzór na d jest następujący

$$d = \frac{\lambda}{2\,|\cos\alpha_N - \cos\alpha_J|}, \tag{15}$$

przy czym zgodnie z poprzednimi rozważaniami, aby nie było dodatkowych minimów ani maksimów muszą być spełnione warunki

$$d < \frac{\lambda}{1 + |\cos\alpha_N|}, \quad d < \frac{\lambda}{1 + |\cos\alpha_J|}. \tag{16}$$

Uwzględniając wzór (12) na d otrzymujemy

$$1 + |\cos\alpha_N| < 2\,|\cos\alpha_N - \cos\alpha_J|\,, \quad 1 + |\cos\alpha_J| < 2\,|\cos\alpha_N - \cos\alpha_J|\,. \tag{17}$$

Korzystając z wyznaczonego d, przepiszmy jeszcze wzór (5) na ϕ_0 w jawnej postaci

$$\phi_0 = \pi\frac{\cos\alpha_J}{|\cos\alpha_N - \cos\alpha_J|}. \tag{18}$$

Zauważmy, że zamiast najpierw rozważać kierunek o maksymalnym natężeniu fali wypadkowej, moglibyśmy najpierw rozważać kierunek o zerowym natężeniu tej fali i stąd wyznaczać przesunięcie fazowe. To dałoby wzór na przesunięcie fazowe (z dokładnością do wielokrotności 2π)

$$\phi_0 = 2\pi\frac{d}{\lambda}\cos\alpha_N - \pi. \tag{19}$$

Otrzymane drugą metodą wyrażenie na d oraz warunki na d będą takie same jak metodą pierwszą. Podstawiając jawną postać d do powyższego wyrażenia otrzymamy

$$\phi_0 = \pi\frac{\cos\alpha_N}{|\cos\alpha_N - \cos\alpha_J|} - \pi. \tag{20}$$

Różnica między prawymi stronami równań (20) oraz (18) jest równa 0 lub 2π (w zależności od znaku różnicy $\cos\alpha_N - \cos\alpha_J$), zatem otrzymane obiema metodami różnice faz są ze sobą zgodne.

Dla zestawu danych a) z (15) otrzymujemy $d = 0{,}306$ m. Warunki (16) w tym przypadku dają $d < 0{,}566$ m i $d < 0{,}536$ m, zatem rozważana sytuacja jest możliwa.

Dla zestawu danych b) z (15) otrzymujemy $d = 0{,}832$ m. Warunki (16) w tym przypadku dają $d < 0{,}745$ m i $d < 0{,}794$ m, zatem rozważana sytuacja nie jest możliwa.

Informacja dodatkowa:

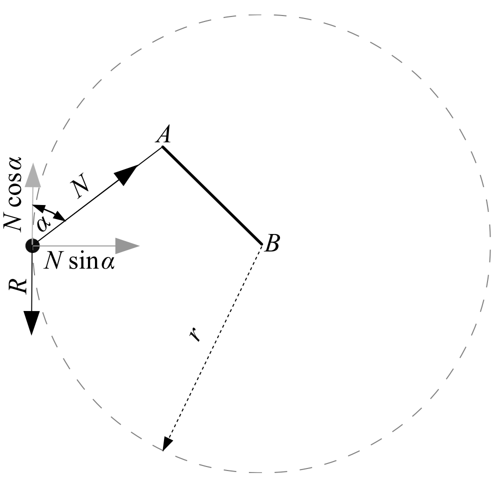
Zauważmy, że taki układ anten poprzez zmianę przesunięcia fazy zmienia kierunek wzmocnienia wysyłanej fali. Jest to zasadą działania radarów sterowanych fazowo – nie posiadających obracanej anteny kierunkowej. Zobacz też np. *Szyk fazowany* w Wikipedii.

Punktacja zadania 1.

Wyznaczenie długości fali (wzór (3)) i wykorzystanie tej długości w rozwiązaniu zadania .... 1 pkt.
Zauważenie, że maksimum natężenia fali występuje przy interferencji konstruktywnej i zapisanie warunku na nią (wzór (4) lub równoważny wykorzystujący wzór (1)) .... 1 pkt.
Wzór na różnicę faz ϕ_0 (wzór (5), wzór (20) lub wzór równoważny) .... 1 pkt.
Warunek na maksimum tylko w jednym kierunku (wzór (9) lub równoważny) .... 1 pkt.
Zauważenie, że zerowe natężenia fali występuje przy interferencji destruktywnej i zapisanie warunku na nią (wzór (11) lub równoważny wykorzystujący wzór (1)) .... 1 pkt.
Odległość między antenami (wzór (12) lub równoważny) .... 1 pkt.
Warunek na występowanie zerowego natężenia fali tylko w w jednym kierunku (wzór (13) lub równoważny) .... 1 pkt.
Uzasadnienie, że we wzorze (12) powinno być $n_N = 0$ .... 1 pkt.
Wniosek (wraz z uzasadnieniem), że w przypadku a) rozważana sytuacja jest możliwa i podanie prawidłowej wartości d .... 1 pkt.
Wniosek (wraz z uzasadnieniem), że w przypadku b) rozważana sytuacja jest niemożliwa .... 1 pkt.

Rozwiązanie zadania 2

Na kulkę działa siła napięcia nici N – skierowana wzdłuż nici do punktu A, oraz siła oporu powietrza R – skierowana przeciwnie do kierunku ruchu kulki, patrz rys. 2.



Rys. 2. Siły działające na kulkę

Ponieważ kulka porusza się z prędkością o stałej wartości, składowe styczne do okręgu, po którym się ona porusza, muszą się równoważyć

$$R = N\cos\alpha, \tag{21}$$

gdzie α jest kątem między kierunkiem wyznaczonym przez nić a kierunkiem ruchu kulki.

Ponieważ kulka porusza się po okręgu, składowa w kierunku od kulki do punktu B siły naciągu nici powoduje przyspieszenie dośrodkowe, czyli

$$N\sin\alpha = m\frac{v^2}{r}, \tag{22}$$

gdzie v jest prędkością kulki.

Uwzględniając wzór na siłę oporu powietrza, otrzymujemy

$$\operatorname{ctg}\alpha = \frac{cr}{m}. \tag{23}$$

Z twierdzenia cosinusów

$$d = \sqrt{r^2 + l^2 - 2rl\cos\left(90^{\circ} - \alpha\right)} = \sqrt{r^2 + l^2 - 2rl\sin\alpha}. \tag{24}$$

Z zależności trygonometrycznych

$$\sin\alpha = \frac{1}{\sqrt{1+\operatorname{ctg}^2\alpha}}. \tag{25}$$

Zatem ostatecznie

$$d = \sqrt{r^2 + l^2 - 2\frac{rl}{\sqrt{1+\frac{c^2r^2}{m^2}}}}. \tag{26}$$

Wynik ten nie zależy od mocy P.

Zauważmy, że dla pomijalnie małych wartości cr/m otrzymujemy

$$d = \left|r - l\right|, \tag{27}$$

co – zgodnie z oczekiwaniami – oznacza, że kulka znajduje się na prostej wyznaczonej przez pręt.

Dla bardzo dużych wartości cr/m (bardzo duża siła oporu) otrzymamy

$$d = \sqrt{r^2 + l^2}, \tag{28}$$

co oznacza, że nić jest styczna do okręgu, po którym porusza się kulka.

b) W otrzymanym związku między d, r oraz l nie występuje moc P, a zatem nie zależy on od prędkości kątowej obrotu pręta. Zatem, w tym przypadku promień okręgu, po jakim będzie poruszała się kulka będzie taki sam zarówno dla mocy P jak i dla mocy P'. Ponieważ prędkość kątowa będzie dwa razy większa, również prędkość kulki będzie dwa razy większa. Oznacza to, że siła oporu powietrza wzrośnie 2^2 raza, a w konsekwencji moc $P' = 2\cdot 2^2 P$. Czyli

$$P' = 8P. \tag{29}$$

Punktacja zadania 2.

Związek między siłą napięcia nici a siłą oporu (wzór (21) lub równoważny) oraz związek między siłą napięcia nici a siłą dośrodkową (wzór (22) lub równoważny) .... 3 pkt.
Równanie pozwalające wyznaczyć kąt między nicią a kierunkiem ruchu kulki (wzór (23) lub równoważny) .... 2 pkt.
Wyznaczenie długości pręta (wzór (26)) .... 2 pkt.
Uzasadnienie, że promień okręgu, po którym porusza się kulka, nie zależy od prędkości kątowej tego ruchu .... 1 pkt.
Wyznaczenie mocy szukanej w punkcie b) (wzór (29)) .... 2 pkt.

Rozwiązanie zadania 3

Jeśli do wnętrza zbiornika dostarczymy bardzo małą ilość ciepła ΔQ, to część ΔQ_{p} tego ciepła zostanie zużyta na odparowanie wody, część ΔQ_{w} – na podgrzanie wody, a część ΔQ_{pw} – na podgrzanie pary.

Oznaczmy przez L_V różnicę energii wewnętrznych jednego mola pary oraz jednego mola wody. Energia $\Delta Q_{\mathrm{p},\, p=\mathrm{const}}$ potrzebna do odparowania ΔN moli wody przy ustalonym ciśnieniu zewnętrznym p wynosi

$$\Delta Q_{\mathrm{p},\, p=\mathrm{const}} = L_V \Delta N + p\Delta V, \tag{30}$$

gdzie ΔV jest zmianą objętości pary, a $p\Delta V$ jest pracą niezbędną do takiej zmiany jej objętości (możemy sobie wyobrazić, że pojemnik w którym jest para, jest zamknięty tłokiem – wtedy $p\Delta V$ jest pracą wykonaną na przesunięcie tego tłoka). Ponieważ „zwykłe” parowanie zachodzi przy stałym ciśnieniu, mamy

$$\Delta Q_{\mathrm{p},\, p=\mathrm{const}} = L\Delta N, \tag{31}$$

gdzie L jest molowym ciepłem parowania (podanym w treści zadania). Przy ustalonym ciśnieniu i temperaturze, z równania stanu gazu doskonałego wynika, że $p\Delta V = RT\Delta N$, a zatem z powyższych równań wynika, że

$$L_V = L - RT. \tag{32}$$

Zauważmy, że w przypadku danych z zadania $L_V = 38000$ J/mol.

Z definicji L_V oraz ciepła właściwego mamy

$$\Delta Q_{\mathrm{p}} = L_V \Delta N, \tag{33}$$

$$\Delta Q_{\mathrm{w}} = m_{\mathrm{w}} c_{\mathrm{w}} \Delta T, \tag{34}$$

$$\Delta Q_{\mathrm{pw}} = N_0 c_{\mathrm{V}} \Delta T \tag{35}$$

gdzie ΔN jest ilością (w molach) wody, która odparowała (czyli ilością pary, która powstała), N_0 – początkową ilością pary wewnątrz zbiornika. Zgodnie z równaniem stanu gazu doskonałego $pV = NRT$ mamy

$$V\Delta p = RT\Delta N + RN\Delta T + R\Delta N\Delta T, \tag{36}$$

gdzie $V = V_0 - m_{\mathrm{w}}/\rho$ jest objętością pary, czyli objętością nie wypełnionej wodą części wnętrza zbiornika. Ponieważ gęstość wody jest znacznie większa od gęstości pary, przyjęliśmy tu, że w rozpatrywanym procesie V jest stałe.

Zapiszmy powyższe równanie w postaci

$$V\frac{\Delta p}{\Delta T} = R\frac{\Delta N}{\Delta T}(T+\Delta T) + RN, \tag{37}$$

Ponieważ ΔQ jest bardzo małe, również ΔN oraz ΔT są bardzo małe – jednak ani $\frac{\Delta N}{\Delta T}$, ani $\frac{\Delta p}{\Delta T}$ nie są małymi wielkościami. Ponieważ nie rozpatrujemy temperatur w pobliżu zera absolutnego, możemy pominąć ΔT w porównaniu z T (czyli możemy pominąć składnik proporcjonalny do $\Delta N \Delta T$ w równaniu (36).

Uwzględniając związek $p(T)$ z treści zadania dostaniemy

$$V\alpha\Delta T = RT_0\Delta N + RN\Delta T, \tag{38}$$

a stąd

$$\Delta N = \frac{\alpha - \frac{p_0}{T_0}}{RT_0}V\Delta T. \tag{39}$$

Ponieważ

$$\Delta Q = \Delta Q_{\mathrm{p}} + \Delta Q_{\mathrm{w}} + \Delta Q_{\mathrm{pw}}, \tag{40}$$

otrzymujemy

$$\Delta Q = \left(\frac{\alpha - \frac{p_0}{T_0}}{RT_0}LV + m_{\mathrm{w}}c_{\mathrm{w}} + \frac{p_0 V}{RT_0}c_{\mathrm{V}}\right)\Delta T. \tag{41}$$

Zatem szukana pojemność cieplna wynosi

$$\frac{\Delta Q}{\Delta T} = \left(\frac{\alpha - \frac{p_0}{T_0}}{RT_0}L + \frac{p_0}{RT_0}c_{\mathrm{V}}\right)\left(V_0 - \frac{m_{\mathrm{w}}}{\rho}\right) + m_{\mathrm{w}}c_{\mathrm{w}}. \tag{42}$$

co po uwzględnieniu zależności (32) daje

$$\frac{\Delta Q}{\Delta T} = \left(\frac{\alpha - \frac{p_0}{T_0}}{RT_0}(L - RT_0) + \frac{p_0}{RT_0}c_{\mathrm{V}}\right)\left(V_0 - \frac{m_{\mathrm{w}}}{\rho}\right) + m_{\mathrm{w}}c_{\mathrm{w}}. \tag{43}$$

Po podstawieniu wartości liczbowych w przypadkach a) oraz b) dostajemy:

a) ($m_{\mathrm{w}} = 15$ kg) $\frac{\Delta Q}{\Delta T} = 104\ \frac{\mathrm{kJ}}{\mathrm{K}}$.

b) ($m_{\mathrm{w}} = 2$ kg) $\frac{\Delta Q}{\Delta T} = 50\ \frac{\mathrm{kJ}}{\mathrm{K}}$.

W przypadku c) początkowo nie ma wody, a więc nie może ona parować, zatem wyrażenie na pojemność cieplną przyjmuje postać

$$\frac{\Delta Q}{\Delta T} = \frac{p_0}{RT_0}c_{\mathrm{V}}V_0, \tag{44}$$

tzn. cała pojemność cieplna jest pojemnością cieplną pary wodnej. Podstawiając wartości liczbowe otrzymujemy

c) ($m_{\mathrm{w}} = 0$) $\frac{\Delta Q}{\Delta T} = 1{,}1\ \frac{\mathrm{kJ}}{\mathrm{K}}$.

Punktacja zadania 3.

Wzory (33), (34) oraz (35) na odpowiednie ciepła oraz ich wykorzystanie (po jednym punkcie za każdy wzór) . . . . 3 pkt.
Związek między przyrostem temperatury a przyrostem ilości pary (wzór (38) lub równoważny) . . . . 2 pkt.
Jawny wynik końcowy na szukaną pojemność cieplną (wzór (43) lub równoważny) . . 2 pkt.
Wyniki – wartości pojemności cieplnej, po 1 pkt. za każdy prawidłowy wynik a), b) lub c); punkty otrzymuje się nawet jeśli nie podano wzoru ogólnego, ale wykorzystano wzory prawdziwe w określonym przypadku, np. (44) w przypadku c) lub w przypadkach a) i b) przyjęto $V \approx V_0$) . . . . 3 pkt.

Uwaga:

Ponieważ na poziomie szkolnym może być nie do końca jasne, że podane molowe ciepło parowania L odnosi się do procesu przy stałym ciśnieniu, rozwiązania w których zamiast L_V użyto L są również traktowane jako poprawne. Wyniki liczbowe w takim przypadku są następujące:

a) ($m_\mathrm{w} = 15$ kg) $\frac{\Delta Q}{\Delta T} = 108\ \frac{\mathrm{kJ}}{\mathrm{K}}$.

b) ($m_\mathrm{w} = 2$ kg) $\frac{\Delta Q}{\Delta T} = 54\ \frac{\mathrm{kJ}}{\mathrm{K}}$.

c) ($m_\mathrm{w} = 0$) $\frac{\Delta Q}{\Delta T} = 1{,}1\ \frac{\mathrm{kJ}}{\mathrm{K}}$.