

ANALIZA PRACY STATYCZNEJ ZBIORNIKA PROSTOPADŁOŚCIENNEGO PODDANEGO DZIAŁANIU TEMPERATURY

Wiesław Buczkowski¹, Stanisław Czajka², Tomasz Pawlak²

¹Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie

²Akademia Rolnicza w Poznaniu

Streszczenie. W pracy przedstawiono obliczenia zbiornika prostopadłościennego poddanego działaniu temperatury wykonane metodą różnic skończonych w ujęciu wariacyjnym. Uzyskane wyniki obliczeń porównano z obliczeniami znanymi z literatury oraz z polskich norm. Stwierdzono, że występujące różnice wynikają z braku uwzględnienia w obliczeniach analitycznych przestrzennej pracy konstrukcji, jakim jest zbiornik prostopadłościenny.

Słowa kluczowe: zbiornik prostopadłościenny, obciążenie temperaturą, parcie hydrostatyczne, momenty zginające, ugięcia.

WSTĘP

Obciążenie ustroju skrzyniowego temperaturą w zakresie różnicy temperatury $\Delta\theta = \pm 30^\circ\text{C}$, często występującej w normalnej eksploatacji, może wywołać w konstrukcji znacznie większe siły przekrojowe niż obciążenia tradycyjne typu parcie gruntu czy wody. W odniesieniu do płyt obciążonych temperaturą dla wielu schematów statycznych rozwiązania na drodze obliczeń analitycznych uzyskał Thrun [1954] i na podstawie tychże wyników można również uzyskać potwierdzenie powyższego spostrzeżenia. W ustrojach, w których siły przekrojowe wywołane działaniem temperatury będą tego samego znaku co siły powstałe od pozostałych obciążeń, może dojść do awarii w przypadku niebrania tych sił pod uwagę w procesie projektowania. Przykładem ustroju, w którym sumują się momenty zginające powstałe od obciążeń termicznych oraz parcia gruntu na ściany, może być zbiornik prostopadłościenny zagłębiony w gruncie, a w okresie zimowym całkowicie opróżniony. Temperatura gruntu zewnętrznego, wynosząca około $+8^\circ\text{C}$,

¹Adres do korespondencji – Corresponding author: Wiesław Buczkowski, Tomasz Pawlak, Akademia Rolnicza w Poznaniu, Katedra Mechaniki Budowli i Budownictwa Rolniczego, ul. Piątkowska 94, 61-691 Poznań, e-mail: kmbibr@au.poznan.pl

²Stanisław Czajka Akademia Rolnicza w Poznaniu, Katedra Metod Matematycznych i Statystycznych, ul. Wojska Polskiego 28, 60-637 Poznań, e-mail: sczajka@au.poznan.pl

będzie wyższa od temperatury powietrza wewnątrz zbiornika, która zgodnie z normą PN-86/B-02015 może wynosić -24°C . W takim przypadku siły przekrojowe powstałe od parcia gruntu działającego na ściany i dno zbiornika będą się sumowały z wpływami od obciążeń termicznych.

Biorąc powyższe pod uwagę, należy stwierdzić, że znajomość statyki ustrojów skrzyniowych poddanych działaniu temperatury jest konieczna i ma istotne znaczenie w procesie prawidłowego projektowania obiektów oraz ich późniejszej eksploatacji. Zgodnie z polską normą, odnoszącą się do obciążeń budowli, w obliczeniach statycznych obiektów inżynierskich, w tym również zbiorników prostopadłościennych, należy uwzględnić obciążenie temperaturą [PN-86/B-02015]. W tego rodzaju obliczeniach można wykorzystać metodę różnic skończonych w ujęciu wariacyjnym, nadającą się doskonale do wykonywania obliczeń płyt oraz ustrojów skrzyniowych obciążonych w sposób tradycyjny oraz temperaturą. Uwzględnienie obciążenia temperaturą w przypadku jednorodnego pola temperatury na całej ścianie budowli podziemnej jest zadaniem dość trudnym. Trudności zwiększają się, gdy trzeba w obszarze płyty uwzględnić różne wartości temperatury, zależne na przykład od zagłębienia zbiornika w gruncie. Poza tym norma PN-86/B-02015 mówi, że w okresie zimowym temperaturę powietrza na zewnątrz budowli należy przyjmować -24°C . Nie jest natomiast określone, jaką różnicę temperatury między powierzchniami ścian należy przyjąć do obliczeń. Tę różnicę, w przypadku budowli otwartych i zamkniętych, można obliczyć na podstawie zależności podanych w normach PN-86/B-02015 i PN-EN ISO 6946:1999 po określeniu temperatury, jaka wystąpi na powierzchniach ścian od zewnątrz i wewnątrz budowli. Jak wiadomo, obniżanie się temperatury powietrza czy elementu poddanego jej działaniu jest procesem stopniowym, rozłożonym w czasie. Również betonowa ściana zbiornika ulega w określonym czasie przemarznięciu. Najczęściej, nim temperatura powietrza zewnętrznego osiągnie -24°C , ściana w całym przekroju ulegnie przemarznięciu, a w takim przypadku w zasadzie niewielkie znaczenie ma temperatura gruntu za ścianą, nawet dodatnia. Powstaje zatem pytanie, jaką różnicę temperatury między powierzchnią zewnętrzną a wewnętrzną ścian należy przyjąć do obliczeń?

W normie PN-89/B-03262 dotyczącej zbiorników żelbetowych na materiały sypkie zaleca się, aby obliczeniowe momenty zginające w ścianach zbiorników prostopadłościennych (ustrojach płytowych) obciążonych temperaturą obliczać według zależności:

$$M = \gamma_f \frac{1}{h} \Delta \vartheta \alpha_t B \quad (1)$$

gdzie: γ_f – współczynnik obciążenia ($\gamma_f = 1,1$),

h – grubość płyty,

$\Delta \vartheta$ – różnica między temperaturą powierzchni zewnętrznej a temperaturą powierzchni wewnętrznej przegrody [$^{\circ}\text{C}$],

α_t – współczynnik rozszerzalności termicznej betonu [$1 \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$],

B – sztywność przekroju żelbetowego [$\text{kN}\cdot\text{m}$].

Przyjmując $\nu = 0$ oraz podstawiając $B = Eh^3 \cdot [12(1 - \nu^2)]^{-1}$ z zależności (1), otrzymano wzór określający wartość charakterystyczną momentu zginającego od obciążenia temperaturą w postaci:

$$M = 0,0833Eh^2\Delta\vartheta\alpha_t$$

Obliczanie momentów zginających według zależności (1) daje w niektórych przypadkach wartości mniejsze niż rzeczywiście występujące. Krytyczną ocenę takiego postępowania zamieszczono m.in. w publikacjach Buczkowskiego [1991, 1992]. Jednak z braku innych praktycznie dostępnych możliwości takie podejście do problemu jest dalej stosowane w praktyce. W celu wykazania, jak duże błędy można popełnić przy wyznaczaniu momentu zginającego od obciążenia temperaturą według zależności (2), a także w celu zobrazowania praktycznej możliwości spełnienia wymagań zawartych w normie PN-86/B-02015, zamieszczono poniższe przykłady liczbowe.

METODA OBLICZEŃ

Obliczenia przykładowe wykonano metodą wariacyjnego ujęcia różnic skończonych. Metoda ta była już wielokrotnie sprawdzona w praktyce i zawsze dawała dobre rezultaty. Również tę metodę zweryfikowano w zakresie statyki płyt obciążonych temperaturą. Osiągnięte wyniki w porównaniu z obliczeniami analitycznymi były zadowalające [Buczkowski i Mikołajczak 1979]. Wzór (3), opisujący energię odkształcenia sprężystego ustrojów płytowych z uwzględnieniem wpływów temperatury, zaczerpnięto z pracy Kączkowskiego [1968].

$$V = \frac{D}{2} \iint_A \left[(\nabla^2 w)^2 - 2(1-\nu) \left[\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} - \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right)^2 \right] + 2(1+\nu) \frac{\alpha_t \Delta T}{h} \left(\nabla^2 w + \frac{\alpha_t \Delta T}{h} \right) \right] dA + \frac{1}{2} \iint_A K w^2 dA - \iint_A q w dA \quad (3)$$

gdzie: w – ugięcie płyty,

ν – współczynnik Poissona,

$D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)}$ – sztywność płyty na zginanie,

h – grubość płyty,

E – współczynnik sprężystości materiału płyty,

A – obszar płyty,

q – obciążenie prostopadłe do środkowej powierzchni płyty,

K – moduł podatności podłoża,

$\Delta T = T^d - T^g$ – różnica temperatury między dolną a górną powierzchnią płyty,

α_t – współczynnik rozszerzalności termicznej betonu [$1 \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$],

T^d – temperatura dolnej powierzchni płyty,

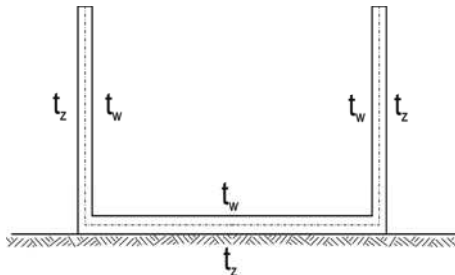
T^g – temperatura górnej powierzchni płyty.

W dalszych rozważaniach dotyczących zbiorników przyjęto:

$T^d = t_z$ (temperatura zewnętrznych płaszczyzn ścian zbiornika),

$T^g = t_w$ (temperatura wewnętrznych płaszczyzn ścian zbiornika).

Przyjęte oznaczenia pokazano na rysunku 1.



Rys. 1. Oznaczenia dotyczące temperatury w ścianach zbiornika

Fig. 1. Designation concerning temperature on walls in tanks

Istota energetycznego ujęcia metody różnic skończonych polega na wyznaczeniu równań różnicowych otrzymanych z warunku na minimum całkowitej energii sprężystej nagromadzonej w rozpatrywanym ustroju, albowiem dla ustroju będącego w stanie statycznej równowagi energia nagromadzona w nim osiąga minimum. Przystępując do obliczeń, rozpatrywany element dzielimy dyskretną siatką i poszukujemy funkcji ugięcia $w(x, y)$ w postaci jej wartości we wszystkich węzłach przyjętej siatki podziału. Wyrażając pochodne ugięcia w funkcjonale (3) za pomocą ilorazów różnicowych oraz wykonując całkowanie zastąpione sumowaniem po elementarnych podobozzarach, otrzymujemy funkcję V jako funkcję zmiennych w_k :

$$V = V(w_k) \quad (4)$$

gdzie w_k – rzeczywiste ugięcia w poszczególnych węzłach siatki.

Układ algebraicznych równań liniowych na wyznaczenie ugięć (w_k) otrzymuje się z warunku na minimum energii:

$$\frac{\partial V(w_k)}{\partial w_k} = 0 \text{ dla każdego } w_k \quad (5)$$

Z uwagi na kwadratową formę wyrażenia na energię otrzymywany układ równań algebraicznych jest zawsze symetryczny względem głównej przekątnej. Fakt ten w znacznym stopniu ułatwia kontrolę poprawności budowania macierzy.

Po rozwiązaniu tak otrzymanego układu równań można wyznaczyć momenty zginające w dowolnym punkcie siatki podziału, jak również momenty zamocowania i siły tnące na krawędziach, rozpisując na różnice skończone wzory znane z teorii płyt. Przykładowo:

$$M_x = -D \left[\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + (1 + \nu) \frac{\alpha_l \Delta T}{h} \right] \quad (6)$$

PRZYKŁADY LICZBOWE

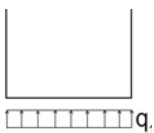
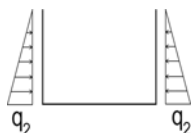
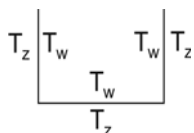
Przykład 1

Analizę wpływu obciążeń temperaturą na pracę statyczną ustroju skrzyniowego przeprowadzono na przykładzie zbiornika, którego wymiary osiowe zachowują proporcje $l_x : l_y : l_z = 2 : 1 : 1$, natomiast grubości wszystkich ścian są identyczne, a dno jest 1,5 raza grubsze od ścian ($h_4 = 1,5 h_1$). Obliczenia wykonano dla trzech poniżej podanych przypadków obciążeń:

- obciążenia równomiernego dna,
- obciążenia hydrostatycznego ścian,
- obciążenia jednakową różnicą temperatury wszystkich ścian i dna.

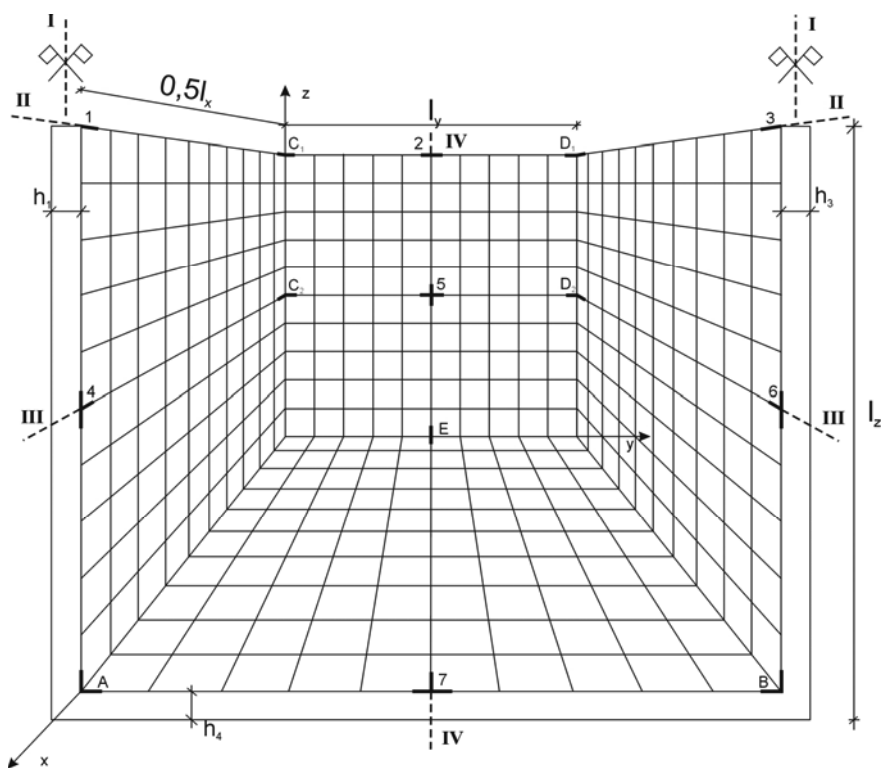
Otrzymane rozwiązania w postaci współczynników proporcjonalnych do ugięć umożliwiających wyznaczenie ugięć oraz sił wewnętrznych w wybranych punktach analizowanego zbiornika zamieszczono w tabeli 1, natomiast przyjęte oznaczenia oraz numerację punktów pokazano na rysunku 2.

Tabela 1. Współczynniki proporcjonalne do ugięć oraz momentów zginających*
Table 1. Factors to calculations of bend and bending moments*

Charakterystyczne wielkości Characteristic quantity	Współczynniki Factors	Obciążenie równomierne dna Uniform load of bottom	Parcie hydrostatyczne działające na ściany Action of earth pressure on walls	Zbiornik poddany działaniu temperatury Tank of temperature action
				
w_1	λ	0,0018	-0,0109	-0,1712
w_2		-0,0003	0,0013	-0,0060
w_7		-0,0023	0,0016	0,0286
M_{x1}		0,0056	-0,0326	-0,1200
M_{C1}		-0,0044	0,0450	0,0778
M_{y2}		-0,0020	0,0028	-0,0963
M_{x4}		0,0048	-0,0187	-0,0961
M_{C2}	-0,0088	0,0459	-0,0782	
M_{y5}	β	0,0017	-0,0080	-0,0784
M_{z4}		0,0047	-0,0181	-0,0580
M_A		0,0204	0,0695	-0,1070
M_{y7}		-0,0785	0,0382	-0,1261
M_{z5}		-0,0008	-0,0057	-0,0765
M_E		0,0280	0,0014	-0,1443
M_{x7}		-0,0152	0,0138	-0,1759

*Dla obciążeń ścian i dna parciem gruntu – For earth load on walls and bottom: $w_i = \lambda \cdot q \cdot l_z^4 \cdot D^{-1}$;
 $M_i = \beta \cdot q \cdot l_z^2$

Dla obciążeń temperaturą – For temperature load: $w_i = \lambda \cdot \alpha_t \Delta T \cdot l_z^2 \cdot h_1^{-1}$; $M_i = \beta \alpha_t \Delta T E h_1^2$



Rys. 2. Przyjęta w obliczeniach siatka podziału oraz oznaczenia
 Fig. 2. Characteristic points of calculation tanks and designations

W zestawieniach tabelarycznych zamieszczonych w niniejszej pracy oraz na wykresach momentów zginających przyjęto, że ugięcia dodatnie skierowane są na zewnątrz zbiornika, natomiast dodatnie momenty zginające powodują rozciąganie zewnętrznych włókien ścian i dna zbiornika.

W celu pokazania wartości, jakie mogą wystąpić w normalnej eksploatacji, dokonano poniższego zestawienia dla konkretnego obiektu.

Przyjęto dane:

- wymiary osiowe zbiornika $l_x = 10$ m, $l_y = 5$ m, $l_z = 5$ m,
- grubości ścian $h_1 = h_2 = h_3 = 0,3$ m,
- grubość dna $h_4 = 0,45$ m,
- współczynnik sprężystości betonu $E = 27$ GPa,
- współczynnik Poissona $\nu = 0$.

Założono, że zbiornik jest zagłębiony w gruncie oraz że jest całkowicie opróżniony w okresie zimowym. Wartość obliczeniowa obciążenia gruntem równomiernie rozłożonego na dnie, powstałego od ciężaru ścian bocznych, wynosi:

$$q_1 = \frac{(10,3 + 4,7) \cdot 2 \cdot 4,85 \cdot 0,3 \cdot 25 \cdot 1,1}{10,3 \cdot 5,3} = 22 \text{ kN/m}^2$$

Spoczynkowe parcie gruntu (wartość obliczeniowa), działające na ściany boczne w przypadku zagęszczonych piasków grubych i średnich mało wilgotnych, zgodnie z normą PN-88/B-02014, wynosi:

$$q_2 = \gamma \cdot z \cdot K_o \cdot \gamma_f = 18 \cdot 5 \cdot 0,5 \cdot 1,2 = 54 \text{ kN/m}^2$$

Norma PN-86/B-02015 mówi, że w obliczeniach budowli lądowych i wodnych należy uwzględnić obciążenie temperaturą. W odniesieniu do budowli zagłębionych w gruncie temperaturę gruntu w okresie zimowym należy przyjmować:

- do głębokości przemarzania -5°C ,
- poniżej tej głębokości do 3 m od powierzchni terenu $+5^\circ\text{C}$,
- na głębokości poniżej 3 m $+10^\circ\text{C}$.

Zgodnie z normami PN-86/B-02015, PN-EN ISO 6946:1999, różnicę między temperaturą powierzchni ściany stykającej się z gruntem a powierzchnią ściany stykającą się z chłodnym powietrzem można obliczyć z zależności:

$$\Delta\vartheta = \Delta T = (t_e - t_i)kR - a\xi_3 \quad (7)$$

gdzie: $t_e = t_z$ – temperatura powietrza zewnętrznego,

$t_i = t_w$ – temperatura powietrza wewnętrznego

t_w – temperatura powietrza wewnątrz zbiornika,

t_z – temperatura gruntu za ścianą zbiornika,

k – współczynnik przenikania ciepła

$$k = \frac{1}{R_g + R + R_e} \quad (8)$$

$R_e = 0,05 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ – opór przyjmowania ciepła na powierzchni od strony chłodniejszej,

$R_g = 0,8 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ – opór cieplny gruntu przylegającego do ściany wraz z oporami przyjmowania ciepła na głębokości 3 m poniżej terenu,

$R_g = 1,1 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ – opór cieplny gruntu przylegającego do ściany wraz z oporami przyjmowania ciepła na głębokości 5 m poniżej terenu,

$R = 0,176 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ – opór cieplny przegrody betonowej o grubości $h = 0,3 \text{ m}$ bez oporów przyjmowania ciepła,

$a = 8^\circ\text{C}$ – dobowa amplituda temperatury powietrza zewnętrznego,

ξ_3 – współczynnik redukcji dobowej amplitudy różnicy temperatury, zależny od grubości i właściwości cieplnych materiału oraz od czasu (zawiera się w przedziale od około 0 do około 0,9) [PN-86/B-02015].

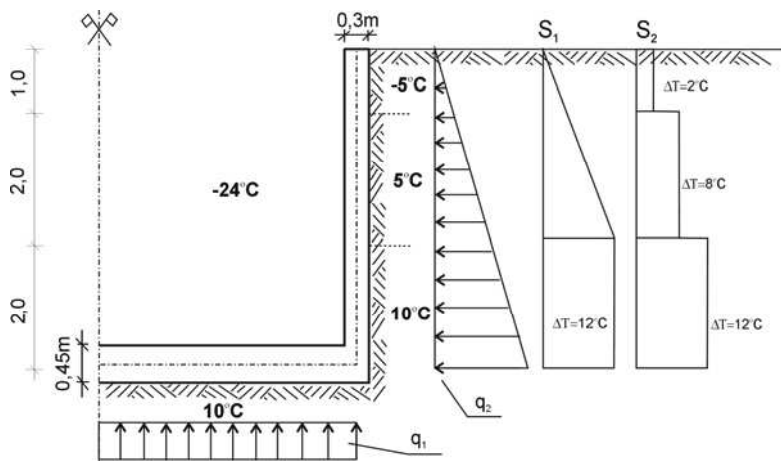
Uwzględniając te dane w skrajnych warunkach, różnice temperatury (ΔT) między powierzchniami ścian w analizowanym zbiorniku obliczone z zależności (7) mogą wynosić:

- na głębokości 3 m od -6°C do -13°C ,
- na głębokości 5 m od -5°C do -12°C .

Podobne wyniki można uzyskać na podstawie obliczeń wykonanych według zależności znanych z termodynamiki [Buczowski 1991].

Z uwagi na możliwość całkowitego przemarznięcia gruntu w wierzchniej warstwie przyjęto dalej, że różnica temperatury między płaszczyznami ściany górnej części zbiornika tuż przy powierzchni terenu będzie wynosiła 0°C .

Z powyższych rozważań otrzymano dla ścian analizowanego zbiornika liniowy rozkład różnicy temperatury, pokazany na rysunku 3 – schemat S_1 , natomiast do obliczeń przyjęto schemat S_2 , stosując się do zaleceń normy PN-86/B-02015. Uwzględniając współczynniki zawarte w tabeli 1, obliczono momenty zginające w wybranych punktach analizowanego zbiornika od obciążeń rzeczywistych. Uzyskane wyniki zestawiono w tabeli 2. W tabeli 3 natomiast pokazano porównanie wyników obliczonych za pomocą metody różnic skończonych w ujęciu wariacyjnym i według wzoru (2).



Rys. 3. Rozkłady obciążeń gruntem oraz temperaturą przyjęte do obliczeń
Fig. 3. Place apart earth and temperature load to calculation of tank

Tabela 2. Ugięcia [cm] i momenty zginające [$\text{kNm}\cdot\text{m}^{-1}$] w wybranych punktach dla rozpatrywanego przykładu liczbowego

Table 2. Bend [cm] and bending moments [$\text{kNm}\cdot\text{m}^{-1}$] in characteristic points of calculations tank

Oznaczenie punktów według rysunku 1 Designation points according to Figure 1	2 + 3			4 + 5	
1	2	3	4	5	6
w_1	0,08	-0,72	-0,64	-0,02	-0,66
w_2	-0,01	0,09	0,8	-0,01	0,07
w_7	-0,13	0,18	0,05	0,00	0,05
M_{x1}	3,08	-44,01	-40,93	-5,83	-46,76

Tabela 3 cd.
Table 3 cont.

1	2	3	4	5	6
M_{C1}	-2,42	60,75	58,33	3,78	62,11
M_{y2}	-1,10	3,78	2,68	-4,68	-2,00
M_{x4}	2,64	-25,25	-22,61	-18,68	-41,29
M_{C2}	-4,84	61,97	57,13	-15,20	41,93
M_{y5}	0,94	-10,80	-9,86	-15,24	-25,10
M_{z4}	2,59	-24,44	-21,85	-11,28	-33,13
M_A	11,22	93,83	105,05	-31,20	73,85
M_{y7}	-43,18	51,57	8,39	-36,77	-28,38
M_{z5}	-0,44	-7,70	-8,14	-14,87	-23,01
M_E	15,40	1,89	17,29	-42,08	-24,79
M_{x7}	-8,36	18,63	10,27	-51,29	-41,02

Tabela 3. Porównanie największych momentów zginających od obciążenia temperaturą
Table 3. Compare greatest bending moments of temperature load

Element Element	Różnica temperatury Temperature difference	Największy moment zginający według wzoru (2) Greatest bending moment from (2) formula	Największy moment zginający obliczony metodą MRS [kNm/m] Greatest bending moment from MRS method		
Zbiornik o grubości ścian i dna $h_s = 0,3$ m, $h_d = 0,45$ m Tank with thickness of walls and bottom $h_s = 0,3$ m, $h_d = 0,45$ m	2°C	-4,05 kNm/m	$M_{x1} = -5,83$	$M_{C1} = +3,78$	$M_{y2} = -4,68$
	8°C	-16,20 kNm/m	$M_{x4} = -18,68$	$M_{C2} = -15,20$	$M_{y5} = -15,24$
	12°C	-24,30 kNm/m	$M_A = -31,20$	$M_E = -42,08$	$M_{x7} = -51,29$

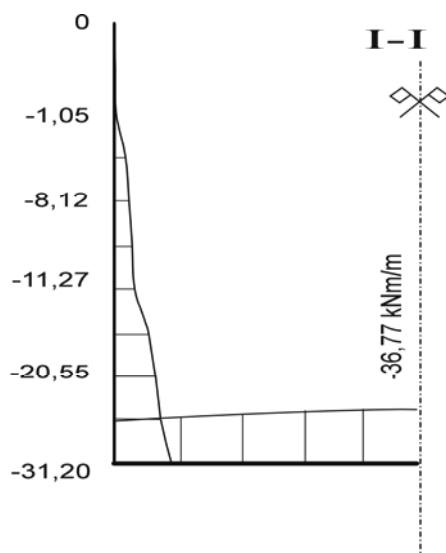
Rysunek 4 obrazuje rozkład momentów zginających w przekroju pionowym I-I dla przedstawionego wyżej przykładu liczbowego od obciążenia temperaturą.

Przykład 2

W przykładzie 2 obliczono zbiornik prostopadłościenny dla danych:

- długość zbiornika $l_x = 15$ m,
- szerokość zbiornika $l_y = 10$ m,
- wysokość zbiornika $l_z = 5$ m.

Zbiornik stoi na gruncie o module podatności podłoża $K = 50\,000$ kN·m⁻³. Moduł sprężystości materiału $E = 27$ GPa, współczynnik Poissona $\nu = 0$. Obciążenie zbiornika stanowiło parcie cieczy na dno i ściany o wielkości $q = 50$ kN·m⁻² oraz różnicy tempera-



Rys. 4. Rozkład momentów zginających od obciążenia temperaturą w przekroju I-I
Fig. 4. Place apart of bending moments with temperature load in section I-I

tury $\Delta T = -15^\circ\text{C}$, którą przyjęto jednakową dla ścian i dna. Obliczenia wykonano, przyjmując grubość dna $h_4 = 0,45$ m oraz grubości ścian:

- przypadek 1: $h_1 = h_2 = h_3 = 0,30$ m (schemat A – rys. 5 i 6),
- przypadek 2: $h_1 = h_3 = 0,30$ m, $h_2 = 0,45$ m (schemat B – rys. 5 i 6),
- przypadek 3: $h_1 = h_3 = 0,45$ m, $h_2 = 0,30$ m (schemat C – rys. 5 i 6).

gdzie: h_1 i h_3 oznaczają grubości ścian o wymiarach l_x i l_z , a h_2 – grubości ścian o wymiarach l_y i l_z .

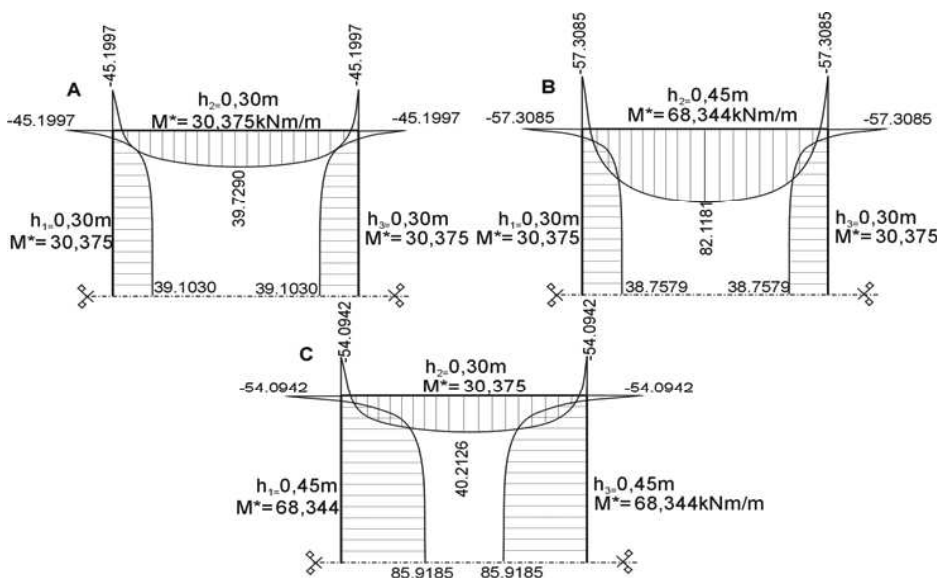
Wykorzystując program TEZO [Buczkowski i Czajka 1992], bazujący na metodzie wariacyjnego ujęcia różnic skończonych, wykonano obliczenia ugięć, sił tnących oraz momentów zginających. Założono, że temperatura zmienia się liniowo na grubości ścian i dna, proces jest stacjonarny, a temperatura jest stała w podobszarach.

Na rysunku 5 i 6 pokazano otrzymane wielkości i rozkłady momentów zginających w przekroju poziomym na górnej krawędzi oraz w połowie wysokości dla zbiornika obciążonego różnicą temperatury $\Delta T = -15^\circ\text{C}$. Wartości z gwiazdką pokazane na wykresach dotyczą momentów zginających obliczonych dla poszczególnych ścian według zależności (2).

WNIOSKI

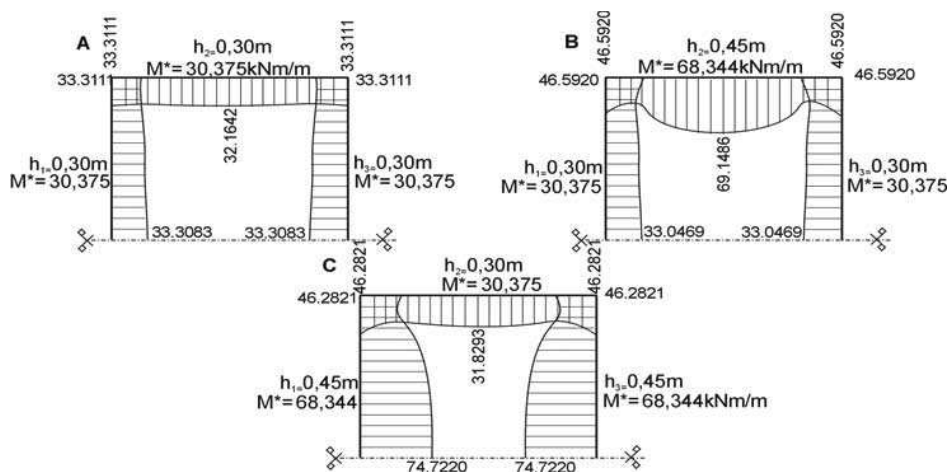
Na podstawie wykonanych obliczeń statycznych wyciągnięto poniższe wnioski:

1. W przypadku zbiorników zagłębionych w gruncie najbardziej niekorzystne warunki statyczne występują w okresie zimowym przy całkowicie opróżnionym zbiorniku. W tym przypadku w licznych punktach konstrukcji momenty zginające, powstałe od parcia gruntu na ściany boczne oraz parcia gruntu działającego na dno, będą tego samego



Rys. 5. Wykres momentów zginających w przekroju II-II, górna krawędź: M^* – moment obliczony z wzoru (2)

Fig. 5. Graph of a bending moments in section II-II, upper edge: M^* – bending moment from formula (2)



Rys. 6. Wykres momentów zginających w przekroju III-III (w połowie wysokości): M^* – moment obliczony z wzoru (2)

Fig. 6. Graph of a bending moments in section III-III (in half height): M^* – bending moment from formula (2)

znaku co momenty powstałe od obciążeń termicznych, a więc będą się sumowały. Momenty zginające powstałe od obciążeń termicznych w analizowanym przykładzie były znacznie większe od momentów powstałych od parcia gruntu.

2. Momenty zginające dla zbiorników wolno stojących na gruncie, powstałe od parcia cieczy znajdującej się w zbiorniku, będą się sumowały z momentami od obciążeń termicznych, w przypadku gdy $t_w > t_z$, przy czym tym większe będą efekty od obciążeń termicznych, im większa będzie różnica temperatury pomiędzy cieczą znajdującą się wewnątrz a temperaturą powietrza zewnętrznego.

3. W literaturze technicznej [Borcz 1987, PN-89/B-03262] jako miarodajny do obliczeń płyt obciążonych temperaturą podaje się moment zginający $M = 0,0833Eh^2\alpha_t\Delta T$. Analizując dane zestawione w tabeli 1, stwierdzono, że w licznych punktach zbiornika obciążonego temperaturą występują większe wartości momentów zginających. Oznacza to, że w tego rodzaju urządzeniach należy każdorazowo wykonywać obliczenia metodami, które umożliwiają uwzględnienie przestrzennej pracy konstrukcji i rzeczywistych warunków brzegowych.

4. Z analizy wykresów pokazanych na rysunkach 5 i 6 wynika wniosek, że w zbiornikach prostopadłościennych nie można prawidłowo określić wielkości momentów zginających wywołanych obciążeniem temperaturą, korzystając z zależności (2). W wielu miejscach w zbiornikach analizowanych w przykładzie 2 rzeczywiście występujące momenty zginające są znacznie większe niż wyznaczone z zależności (2).

PIŚMIENNICTWO

- Borcz A., 1987. Silosy w przemyśle materiałów wiążących. Politechnika Wrocławska, Wrocław.
- Buczkowski W., Mikołajczak H., 1979. Wpływ sztywności dna na pracę statyczną ustrojów skrzyniowych. Konferencja Naukowa PAN, Wrocław, Krynica, 27–34.
- Buczkowski W., 1991. Rechteckige Behälter unter Temperatureinwirkung. Beton und Stahlbetonbau 11, 266–268.
- Buczkowski W., 1992. Momenty zginające w monolitycznych zbiornikach prostopadłościennych obciążonych temperaturą. Inżynieria i Budownictwo 5, 154–156.
- Buczkowski W., Czajka S., 1992. Programy komputerowe dotyczące statyki ustrojów płytowych. Inżynieria i Budownictwo 12, 492–494.
- Kączkowski Z., 1968. Płyty. Obliczenia statyczne. Arkady, Warszawa.
- PN-86/B-02015. Obciążenia budowli. Obciążenia zmienne środowiskowe. Obciążenie temperaturą.
- PN-88/B-02014. Obciążenia budowli. Obciążenie gruntem.
- PN-EN ISO 6946:1999. Komponenty budowlane i elementy budynku. Opór cieplny i współczynnik przenikania ciepła. Metoda obliczania.
- PN-89/B-03262. Zbiorniki na materiały sypkie i kiszonki. Obliczenia statyczne i projektowanie.
- Thrun Z., 1954. Termiczne stany odkształcenia i naprężenia w cienkich płytach. Arch. Mech. Stos. VI, 555–579

ANALYSIS OF STATIC WORK RECTANGULAR TANK UNDER LOAD OF TEMPERATURE

Abstract. In the paper presents calculations of rectangular tank under temperature of load in Finite difference method in variance formulate. Calculations findings in above method compare with calculations knows from literature and polish norms. Results of greatest bending moments gives a descriptions are different than finite difference method in fundamental way. Difference consist in lack allow for in calculations regular space work of construction like rectangular tank.

Key words: rectangular tank, temperature load, hydrostatic pressure, bending moments, bends

Zaakceptowano do druku – Accepted for print: 32.10.2006