

WPŁYW RÓŻNEJ GRUBOŚCI I KONSTRUKCJI ŚCIAN NA PRACĘ STATYCZNĄ MONOLITYCZNYCH ZBIORNIKÓW PROSTOPADŁOŚCIENNYCH

Wiesław Buczkowski, Anna Szymczak-Graczyk

Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu

Streszczenie. W pracy przedstawiono porównanie wielkości i rozkładu ugięć oraz momentów zginających dla trzech monolitycznych zbiorników prostopadłościennych o identycznych wymiarach, różniących się między sobą jedynie grubością i konstrukcją ścian. Dwa zbiorniki miały ściany w całości o jednakowej grubości ($h = 0,25$ m i $h = 0,5$ m), a trzeci miał ściany w dolnej części o grubości 0,5 m, a w górnej 0,25 m. Zmiana grubości nastąpiła skokowo w połowie wysokości ścian. Przeprowadzone obliczenia dotyczyły zbiorników stojących na gruncie, napełnionych cieczą. Uwzględniono również obciążenie ścian temperaturą.

Słowa kluczowe: zbiorniki prostopadłościenne, obciążenie temperaturą, metoda różnic skończonych

WSTĘP

Żelbetowe zbiorniki prostopadłościenne są konstrukcjami powszechnie stosowanymi od wielu dziesięcioleci. W ostatnich latach obserwuje się w Polsce dynamiczny wzrost liczby realizowanych tego typu zbiorników. Ma to ścisły związek w wejściem Polski do Unii Europejskiej oraz dużym naciskiem kładzionym na ochronę środowiska, w którym żyjemy. Buduje się coraz więcej oczyszczalni ścieków, a także wiele zbiorników w gospodarstwach rolnych, przeznaczonych do magazynowania gnojówki i gnojowicy. W związku ze zwiększoną liczbą budowanych zbiorników prostopadłościennych pojawiają się nowe pomysły dotyczące ich konstrukcji, a także obserwuje się dużo przypadków źle zaprojektowanych bądź źle wykonanych obiektów, co prowadzi do konieczności naprawy lub wzmocnienia wykonanych konstrukcji. Źle zaprojektowane lub niewłaści-

Adres do korespondencji – Corresponding author: Wiesław Buczkowski, Anna Szymczak-Graczyk, Uniwersytet Przyrodniczy, Wydział Melioracji i Inżynierii Środowiska, Katedra Mechaniki Budowli i Budownictwa Rolniczego, ul. Piątkowska 94E, 60-649 Poznań, e-mail: kmbibr@up.poznan.pl

wie wykonane obiekty w niektórych przypadkach mogą wręcz wywołać katastrofę budowlaną. Jedną z przyczyn tego stanu rzeczy może być brak prawidłowego rozeznania statyki realizowanych zbiorników, wynikający z faktu posługiwania się w obliczeniach statycznych metodami uproszczonymi, nieuwzględniającymi istoty problemu.

UWAGI DOTYCZĄCE OBLICZEŃ STATYCZNYCH ZBIORNIKÓW PROSTOPADŁOŚCIENNYCH

Dla wszystkich projektujących monolityczne zbiorniki prostopadłościennie oczywiste jest, że są to typowe układy płytowe, charakteryzujące się przestrzenną pracą statyczną, tzn., że obciążenie jednego fragmentu konstrukcji wywołuje przemieszczenia i siły wewnętrzne we wszystkich punktach konstrukcji, nawet w tych, które nie są bezpośrednio obciążone. Z faktu tego wynika, że takich konstrukcji nie można obliczać metodami, które nie uwzględniają przestrzennego charakteru ich pracy statycznej. Z wieloletnich doświadczeń wynika, że monolityczne zbiorniki prostopadłościennie są czułe na wszelkiego rodzaju uproszczenia nieuwzględniające, oprócz przestrzennej pracy statycznej, także rzeczywistych wymiarów zbiorników, rzeczywistych grubości ścian i dna, współpracy konstrukcji z podłożem gruntowym, a także stałych materiałowych (E , ν), odpowiadających materiałowi, z którego ma być wykonany projektowany zbiornik. Problem ten poruszali w swoich pracach: Kłóś i inni [1961], Mikołajczak i inni [1976], Buczkowski i inni [1981], Stachowicz i Ziobroń [1986], Kobiak i Stachurski [1991], Buczkowski [1993b, 1997, 1998].

Innym istotnym problemem jest konieczność uwzględnienia w obliczeniach rzeczywistych obciążeń działających na elementy składowe konstrukcji.

Szczególnie duże trudności może sprawić uzyskanie prawidłowych rozwiązań dla obciążeń temperaturą ΔT (różnicą temperatury pomiędzy zewnętrznymi płaszczyznami ścian). W literaturze spotkać można rozwiązania dla różnych schematów statycznych płyt obciążonych temperaturą opisane przez Thrana [1954, 1957], Nowackiego [1960], Timoshenko i innych [1962], Bareša [1979], Hotzlera [1984], Mikołajczaka i Buczkowskiego [1988], Buczkowskiego [1990b, 2007], Buczkowskiego i Szymczak-Graczyk [2006], a także dla prostych przypadków zbiorników prostopadłościennych opisane przez Buczkowskiego [1990, 1991, 1992, 1993]. Podane tam rozwiązania nie wyczerpują wszystkich zagadnień, jakie mogą wystąpić w praktyce inżynierskiej.

Zbiorniki prostopadłościennie o małych pojemnościach projektuje się najczęściej o ścianach jednakowej grubości na całej wysokości zbiornika. Przy głębszych zbiornikach ściany mają przekrój trapezowy, o grubości zwiększającej się ku dołowi, gdzie największa grubość ściany występuje przy dnie. Takie rozwiązanie jest całkowicie uzasadnione z uwagi na parcie hydrostatyczne, działające na ściany zbiornika. Górna część ścian jest zdecydowanie mniej obciążona niż jej dolne partie.

Również cieńsze ściany w górnej części, która z reguły bardziej narażona jest na wpływy termiczne, ma swoje uzasadnienie, gdy weźmie się pod uwagę, że momenty zginające wywoływane różnicą temperatury (ΔT) pomiędzy poszczególnymi płaszczyznami ścian wzrastają wprost proporcjonalnie do kwadratu ich grubości.

Innym możliwym do zastosowania rozwiązaniem jest zaprojektowanie ścian zbiornika o skokowo zmiennej grubości. Górna część ścian mogłaby być zdecydowanie cieńsza od dolnej.

Oba wspomniane wyżej rozwiązania potęgują jednak trudności natury obliczeniowej, szczególnie gdy weźmie się pod uwagę konieczność uwzględnienia przestrzennej pracy statycznej oraz obciążenia temperaturą. W literaturze spotkać można rozwiązania dla prostych przypadków płyt o liniowo zmiennej grubości opisane przez Timoshenko i Woinowskyego-Kriegera [1962] i Stiglata i Wippela [1973], także obciążonych temperaturą w pozycjach literaturowych Thruna [1957], Bareša [1979], Buczkowskiego [2008]. Dla elementów prętowych o zmiennych sztywnościach rozwiązanie znaleźć można na przykład w pracy Podhoreckiego i Przedpełskiego [1982].

Wykonanie obliczeń statycznych dla monolitycznych zbiorników prostopadłościanowych metodami uproszczonymi bądź wprowadzenie uproszczeń w trakcie wykonawstwa (np. zastąpienie zaprojektowanych ścian o przekroju trapezowym ścianami o jednakowej grubości) może stwarzać realne zagrożenie dla bezpieczeństwa użytkowania konstrukcji, o czym napisano na przykład w pracy Buczkowskiego i innych [2003], a także przedstawiano w licznych artykułach podczas konferencji „zbiornikowych” lub konferencji poświęconym awariom budowlanym.

METODYKA BADAŃ

Obliczenie zbiorników wykonano metodą numeryczną wariacyjnego ujęcia różnic skończonych. Istota metody polega na wyznaczaniu przemieszczeń w węzłach przyjętej siatki podziału, dla których energia nagromadzona w odkształcalnym ustroju osiąga minimum. Szczegóły dotyczące tej metody znaleźć można na przykład w publikacji Wildeggo [1966], a także u Timoshenki i Woinowskyego-Kriegera [1962].

PRZYKŁADOWE OBLICZENIA STATYCZNE DLA ZBIORNIKÓW O RÓŻNEJ GRUBOŚCI I KONSTRUKCJI ŚCIAN

Analizą objęto trzy identycznej wielkości zbiorniki stojące na gruncie, różniące się jedynie grubością ścian. Do obliczeń przyjęto wymiary osiowe: $l_x = 10$ m, $l_y = 5$ m, $l_z = 5$ m. Grubość dna we wszystkich analizowanych zbiornikach wynosiła 0,5 m, natomiast ściany miały grubość odpowiednio: w pierwszym przypadku 0,25 m, w drugim, w dolnej części do połowy wysokości 0,5 m, w górnej części 0,25 m, w trzecim zaś 0,5 m.

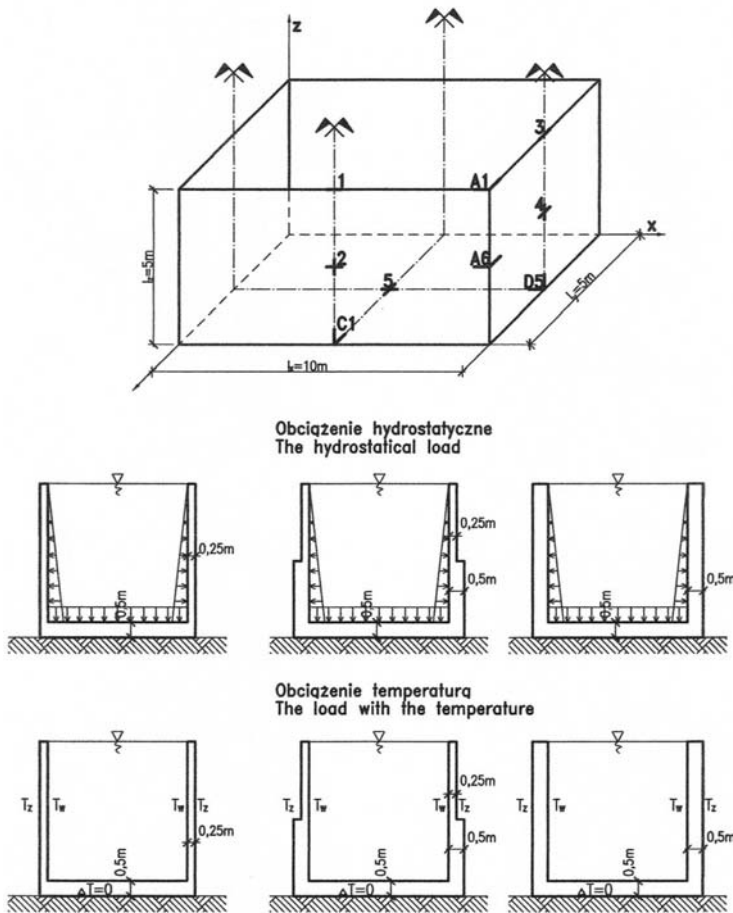
Zbiorniki spoczywały na podłożu gruntowym o module podatności $K = 50\,000$ kN·m⁻³ (model Winklera). W obliczeniach przyjęto: moduł sprężystości materiału ścian $E = 30$ GPa, współczynnik Poissona $\nu = 0$, współczynnik liniowej rozszerzalności termicznej $\alpha_t = 110 \cdot 10^{-5}$ /°C. Jako obciążenie przyjęto:

- ciężar słupa wody działający na dno ($q_1 = 50$ kN·m⁻²),
- parcie hydrostatyczne działające na ściany, przy całkowicie napełnionym zbiorniku ($q_2 = 50$ kN·m⁻²),

– obciążenie ścian różnicą temperatury (ΔT), przy czym przyjęto $T_z = -5^\circ\text{C}$, $T_w = 15^\circ\text{C}$, a stąd $\Delta T = T_z - T_w = -20^\circ\text{C}$; dla dna przyjęto $\Delta T = 0$.

Obliczenia dla zbiorników o jednakowej grubości ścian wykonano programem TEZO, opisanym w artykule autorstwa Buczkowskiego i Czajki [1992], natomiast dla zbiornika ze ścianami o skokowo zmiennej grubości wykonano „na pieczo”, stosując metodę wariacyjnego ujęcia różnic skończonych. W obliczeniach w obszarach o skokowo zmieniającej się grubości przyjęto sztywność jako średnią harmoniczną. Uzasadnieniem takiego przyjęcia były wyniki obliczeń belek zaprezentowane w pracy Podhoreckiego i Przedpełskiego [1982] oraz liczne doświadczenia własne. Przy przyjęciu kwadratowej siatki podziału o oczku $s = 0,5\text{m}$ dla ćwiartki zbiornika otrzymano do wyznaczenia ugięcia w 200 węzłach siatki podziału. Na podstawie otrzymanych ugięć obliczono momenty zginające o charakterystycznych punktach zbiornika.

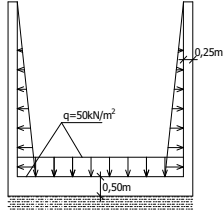
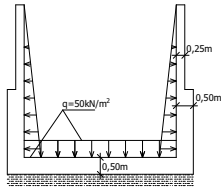
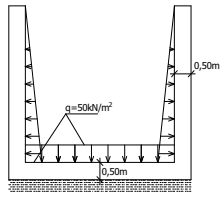
Na rysunku 1 pokazano podstawowe oznaczenia, charakterystyczne przekroje oraz schematy obciążeń. Natomiast w tabelach 1 i 2 zestawiono zbiorcze wyniki obliczeń.



Rys. 1. Podstawowe oznaczenia, charakterystyczne przekroje oraz schematy obciążeń
Fig. 1. Basic marks, characteristic sections and schemata of loads

Tabela 1. Zestawienie zbiorcze dla zbiorników o różnej grubości i konstrukcji ścian. Obciążenie stanowi parcie cieczy na ściany i dno

Table 1. The summary composition for tanks about the different thickness and the construction of walls. The load determine the fluid pressure on walls and the bottom

Oznaczenie według rysunku 1 The mark according to Figure 1	Jednostka The unit			
		$K = 50\,000\text{ kN}\cdot\text{m}^{-3}$	$K = 50\,000\text{ kN}\cdot\text{m}^{-3}$	$K = 50\,000\text{ kN}\cdot\text{m}^{-3}$
w ₁		0,730	0,233	0,097
w ₂		0,412	0,102	0,056
w ₃	cm	-0,073	0,003	-0,011
w ₄		0,010	0,009	-0,001
w ₅		0,016	0,011	0,018
M _{x1}		33,899	10,125	36,029
M _{A1}		-50,884	-24,241	-52,535
M _{y3}		-0,744	4,630	-2,509
M _{x2}		17,513	18,664	19,486
M _{A6}		-47,318	-65,666	-47,894
M _{y4}		8,609	14,040	6,531
M _{z1}		0	0	0
M _{z2}	kN·m·m ⁻¹	16,987	-12,718	18,564
M _{C1}		-112,524	-125,280	-102,719
M _{y5}		38,576	34,480	39,573
M _{z3}		0	0	0
M _{z4}		8,097	-1,339	7,727
M _{D5}		-30,647	-40,750	-40,633
M _{x5}		-1,090	-2,040	0,801

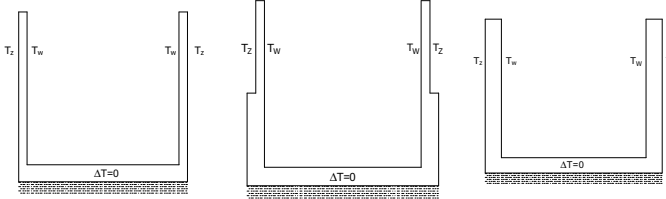
ANALIZA OTRZYMANYCH ROZWIĄZAŃ

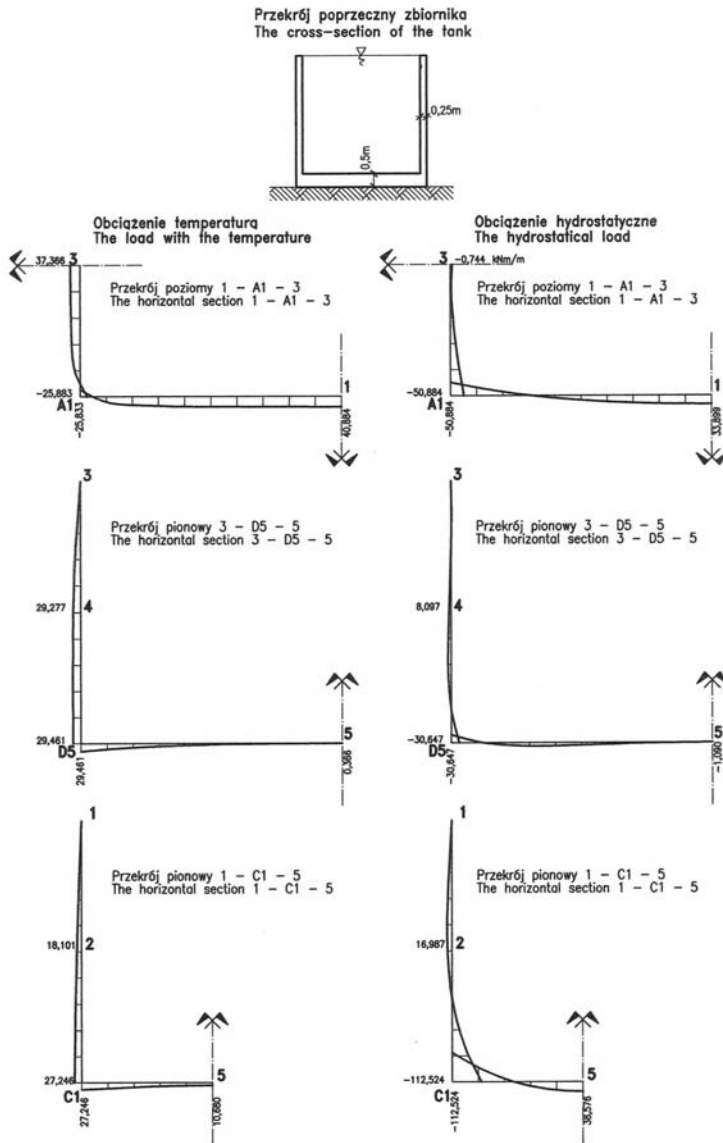
W celu przeanalizowania pracy statycznej obliczonych zbiorników sporządzono wykresy momentów zginających w charakterystycznych przekrojach, tzn. w przekroju poziomym na górnej krawędzi zbiorników i w przekrojach pionowych przechodzących przez osie symetrii zbiorników.

Otrzymane wykresy momentów zginających pokazano na rysunkach 2, 3 i 4.

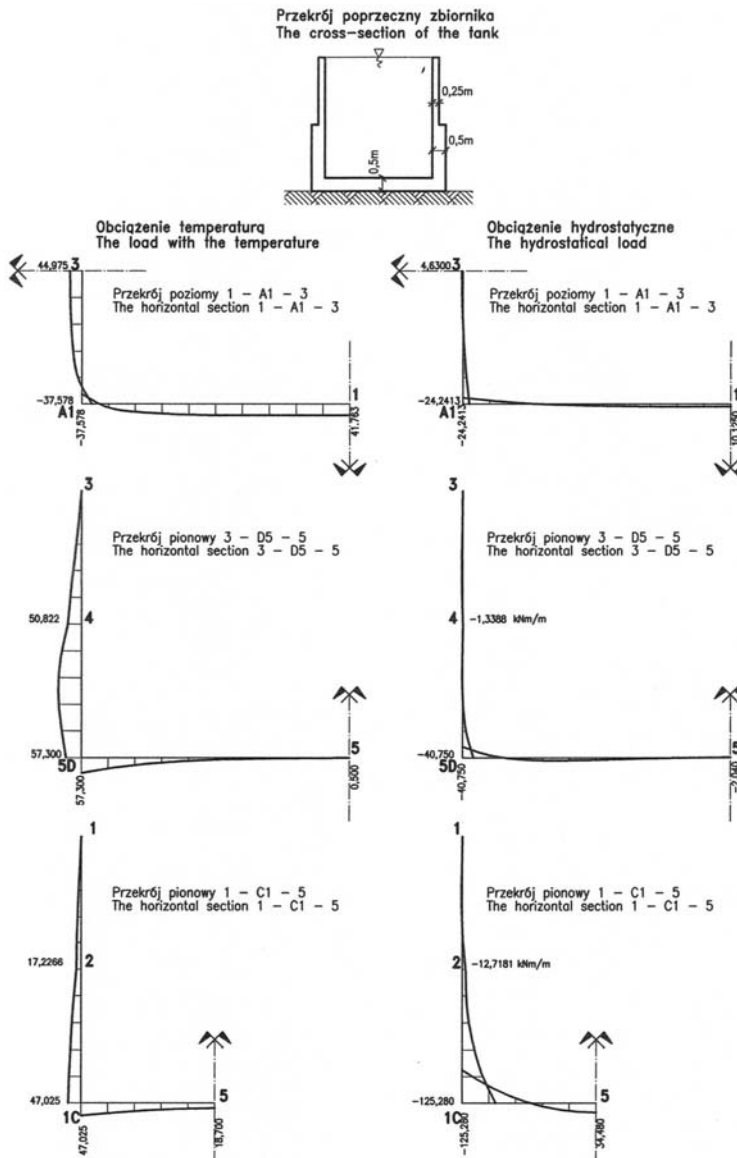
Tabela 2. Zestawienie zbiorcze dla zbiorników o różnej grubości i konstrukcji ścian. Obciążenie stanowi różnica temperatury pomiędzy płaszczyznami ścian zbiorników

Table 2. The summary composition for tank about the different thickness and the construction of walls. The load determine the temperature difference among surfaces of walls of reservoirs

Oznaczenie według rysunku 1 The mark according to Figure 1	Jednostka The unit			
		K = 50 000 kN·m ⁻³	K = 50 000 kN·m ⁻³	K = 50 000 kN·m ⁻³
		$T_w = 15^\circ\text{C}, T_z = -5^\circ\text{C}, \Delta T = T_z - T_w = -20^\circ\text{C}, \text{ dla dna } \Delta T = 0$		
w_1		0,259	0,300	0,098
w_2		0,018	0,026	-0,020
w_3	cm	0,027	0,061	0,019
w_4		-0,024	-0,005	-0,013
w_5		0,014	0,024	0,030
M_{x1}		40,884	41,763	150,777
M_{A1}		-25,883	-37,578	-93,402
M_{y3}		37,366	44,975	153,563
M_{x2}		32,814	99,886	121,098
M_{A6}		37,358	83,334	172,955
M_{y4}		27,288	89,508	103,424
M_{z1}	kN·m·m ⁻¹	0	0	0
M_{z2}		18,101	17,227	61,333
M_{C1}		27,246	47,025	67,804
M_{y5}		10,680	18,700	22,311
M_{z3}		0	0	0
M_{z4}		29,277	50,822	118,977
M_{D5}		29,461	57,300	46,650
M_{x5}		0,366	0,500	3,804

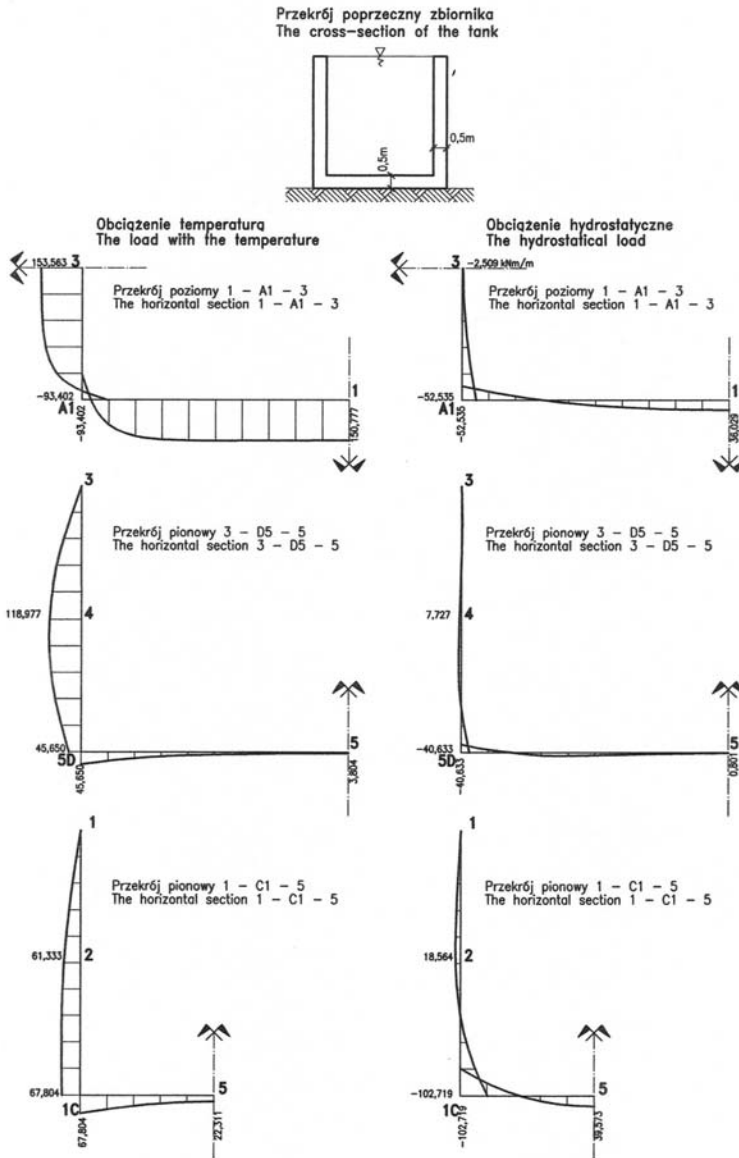


Rys. 2. Wykresy momentów zginających dla zbiornika ze ścianami o grubości 25 cm
Fig. 2. Diagrams of moments bending for the tank with walls about the thickness 25 cm



Rys. 3. Wykresy momentów zginających dla zbiornika ze ścianami o grubości w dolnej części 50 cm, a w górnej 25 cm

Fig. 3. Diagrams of moments bending for the tank with walls about the thickness in the lower 50 cm and in upper 25 cm



Rys. 4. Wykresy momentów zginających dla zbiornika ze ścianami o grubości 50 cm
Fig. 4. Diagrams of moments bending for the tank with walls about the thickness 50 cm

Analizując otrzymane rozwiązania, stwierdzono, że dla zbiornika ze ścianami o skokowo zmiennej grubości nastąpiła istotna redukcja momentów zginających na górnej krawędzi, występujących przy napełnieniu zbiornika cieczą.

Dla obciążenia temperaturą nastąpiła bardzo duża redukcja momentów zginających we wszystkich przekrojach w porównaniu ze zbiornikiem, którego ściany mają grubość 50 cm. Stwierdzono także, że momenty zginające na górnej krawędzi zbiornika, ze ścianami o skokowo zmiennej grubości, wywołane różnicą temperatury (ΔT) są większe niż w zbiorniku ze ścianami o grubości 25 cm, choć w obu przypadkach grubość ścian w analizowanym przekroju była identyczna.

Maksymalne momenty zginające wywołane różnicą temperatury (ΔT) we wszystkich analizowanych zbiornikach były większe, niż można by otrzymać ze wzoru

$$M_t = \frac{Eh^2}{12} \alpha_t \Delta T, \text{ który często stosowany jest w praktyce przy wyznaczaniu momentów}$$

zginających w ustrojach płytowych czy zbiornikach cylindrycznych obciążonych temperaturą. Momenty zginające dla danych dotyczących prezentowanych przykładów, obliczone według powyższego wzoru, wynosiłyby:

$$M_t = 31,25 \text{ kN}\cdot\text{m}\cdot\text{m}^{-1} \text{ dla } h = 0,25 \text{ m,}$$

$$M_t = 125,00 \text{ kN}\cdot\text{m}\cdot\text{m}^{-1} \text{ dla } h = 0,50 \text{ m.}$$

Jak wynika z przedstawionych przykładów, konstruując ściany o zmiennej grubości, otrzymuje się przegrupowanie momentów zginających w stosunku do zbiorników ze ścianami o jednakowej grubości. Chcąc takie rozwiązania stosować w praktyce, należy wykonać rzetelne obliczenia statyczne metodami, które pozwolą uwzględnić przestrzeny charakter pracy statycznej i rzeczywiste parametry zbiornika.

PODSUMOWANIE

Monolityczne zbiorniki prostopadłościenne charakteryzują się przestrzenną pracą statyczną. Przy ich projektowaniu należy posługiwać się metodami, które pozwolą na uwzględnienie tej cechy. Dobierając grubość ścian zbiornika, należy mieć na uwadze fakt, że stosunkowo grube ściany w bezpieczny sposób przenoszą obciążenia na przykład od parcia cieczy, natomiast z uwagi na obciążenie temperaturą ściany powinny być jak najcieńsze, gdyż momenty zginające od tego typu obciążenia wzrastają wprost proporcjonalnie do kwadratu ich grubości. Wydaje się, że rozwiązaniem godzącym oba wymagania są ściany o skokowo zmiennej grubości, zdecydowanie cieńsze u góry niż w części dolnej.

PIŚMIENNICTWO

Bareš R., 1979. Berechnungstabeln für Platten und Wandscheiben. Bauverlag GmbH., Wiesbaden und Berlin (Germany).

- Buczkowski W., 1990a. Praca statyczna monolitycznego, otwartego zbiornika prostopadłościennego poddanego działaniu temperatury. III Ogólnopolska Konf. Nauk.-Tech., „Projektowanie i technologia realizacji zbiorników i konstrukcji powłokowych z betonu”, Kraków, 29–38.
- Buczkowski W., 1990b. Wybrane zagadnienia statyki płyt obciążonych temperaturą. Inżynieria i Budownictwo 10, 375–378.
- Buczkowski W., 1991. Rechteckige Behälter unter Temperatureinwirkung. Beton und Stahlbetonbau 11, 266–268.
- Buczkowski W., 1992a. Potencjalne źródła błędów w projektowaniu zbiorników prostopadłościennych. Mat. Konf. Nauk. Tech. „Żelbetowe i sprężone zbiorniki na materiały sypkie i ciecze”, Wrocław, Szklarska Poręba, 125–134.
- Buczkowski W., 1992b. Momenty zginające w monolitycznych zbiornikach prostopadłościennych obciążonych temperaturą. Inżynieria i Budownictwo 5, 154–156.
- Buczkowski W., 1993a. Obciążenie temperaturą zbiorników prostopadłościennych zagłębionych w gruncie. Inżynieria i Budownictwo 12, 506–508.
- Buczkowski W., 1993b. Wpływ współczynnika Poissona na wielkości statyczne występujące w monolitycznych otwartych zbiornikach prostopadłościennych. Roczniki AR Poznań, 244, Mel. i Inż. Środ. 12, 5–26.
- Buczkowski W., 1997. Uwagi dotyczące obliczeń statycznych zbiorników prostopadłościennych. Inżynieria i Budownictwo 3, 153–154.
- Buczkowski W., 1998. Obliczenia statyczne w zbiorniku prostopadłościennym przy uwzględnieniu przestrzennej pracy statycznej ustroju oraz współpracy konstrukcji z podłożem winklerowskim. Gospodarka Wodna 4, 143–137.
- Buczkowski W., 2007. Obciążenia termiczne belek, płyt i konstrukcji inżynierskich. Wydawnictwo SGGW, Warszawa.
- Buczkowski W., 2008. On reinforcement of temperature loaded rectangular slabs. Archives of civil engineering. L IV, 2, 315–331.
- Buczkowski W., Czajka S., 1992. Programy komputerowe dotyczące statyki ustrojów płytowych. Inżynieria i Budownictwo 12, 492–494.
- Buczkowski W., Szymczak-Graczyk A., 2006. Analiza numeryczna i zbrojenie płyt prostokątnych. Inżynieria i Budownictwo 10, 534–536.
- Buczkowski W., Mikołajczak H., Czwojdziański Z., 1981. Wpływ sztywności dna na pracę statyczną ustrojów skrzyniowych. Inżynieria i Budownictwo 5, 192–196.
- Buczkowski W., Czajka S., Kowalski J., 2003. O przyczynach awarii żelbetowego zbiornika prostopadłościennego. Inżynieria i Budownictwo 12, 683–685.
- Buczkowski W., Czajka S., Pawlak T., 2006. Analiza pracy statycznej zbiornika prostopadłościennego poddanego działaniu temperatury. Acta Scientiarum Polonorum, Architectura 5, (2), 17–29.
- Hotzler H., 1984. Biegemomente in rechteckigen Platten infolge von Temperaturunterschieden. Bauplanung – Bautechnik 3, 121–126, 128.
- Kłóś Cz., Mitzel A., Suwalski J., 1961. Zbiorniki na ciecze. Arkady, Warszawa.
- Kobiak J., Stachurski W., 1991. Konstrukcje żelbetowe. T. 4. Arkady, Warszawa.
- Mikołajczak H., Buczkowski W., 1988. Obliczenia statyczne płyt obciążonych temperaturą. Zeszyty Naukowe Politechniki Poznańskiej, Budownictwo Lądowe, 131–145.
- Mikołajczak H., Buczkowski W., Czwojdziański Z., 1976. Analiza statyczna monolitycznych skrzyń prostokątnych. Inżynieria i Budownictwo 4, 170–175.
- Nowacki W., 1960. Zagadnienia termosprężystości. PWN, Warszawa.
- Podhorecki A., Przedpeński J., 1982. Niektóre problemy obliczania prętów o zmiennych sztywnościach metodą różnic skończonych. Archiwum Inżynierii Lądowej 1–2, 67–77.
- Stachowicz A., Ziobroń W., 1986. Podziemne zbiorniki wodociągowe. Arkady, Warszawa.

- Stiglat K., Wippel H., 1973. Platten. Verlag von Wilhem Ernst & Sohn, Berlin, München, Düsseldorf.
- Thrun Z., 1954. Termiczne stany odkształcenia i naprężenia w cienkich płytach. *Archiwum Mechaniki Stosowanej* 6, 4, 555–579.
- Thrun Z., 1957. O odkształceniach i naprężeniach termicznych w cienkich płytach prostokątnych i kołowych o zmiennej grubości. *Rozprawy Inżynierskie* L VII, 524–541.
- Timoshenko S., Woinowsky-Krieger S., 1962. *Teoria płyty i powłok*. Arkady, Warszawa.
- Wilde P., 1966. Wariacyjne ujęcie różnic skończonych w teorii płyt. *Materiały XII Konferencji Naukowej Komitetu PZITB i Komitetu Inżynierii Lądowej PAN*, Krynica.

THE INFLUENCE OF THE DIFFERENT THICKNESS AND THE CONSTRUCTION OF WALLS ON THE STATIC WORKS PERPENDICULAR MONOLITHIC TANKS

Abstract. In this article has been presented comparison of values and distribution of bending moments for three monolithic perpendicular tanks with the same dimensions, but differ from walls thickness and construction. Analysis results concern of standing on ground tanks, filled with liquid. Also influence of temperature has been taken.

Key words: perpendicular tanks, the load with the temperature, finite differences method

Zaakceptowano do druku – Accepted for print: 15.09.2008