

WPLYW TEMPERATURY SKŁADOWANEGO OŚRODKA SYPKIEGO NA WARTOŚCI SIŁ WEWNĘTRZNYCH W ŚCIANACH KOMORY WALCOWEJ

Radosław DUDA*

Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, Politechnika Białostocka, ul. Wiejska 45A, 15-351 Białystok

Streszczenie: Artykuł dotyczy oceny wartości sił wewnętrznych w walcowej komorze silosu, przeznaczonej do składowania materiału sypkiego w stanie podwyższonej temperatury. Przeprowadzono analizę numeryczną komory poddanej oddziaływaniu sił zewnętrznych oraz obciążeń termicznych. Analizę sił wewnętrznych wykonano na podstawie norm europejskich. Wyniki wskazują znaczący wpływ temperatury ośrodka sypkiego na pracę konstrukcji powłokowych.

Słowa kluczowe: silos żelbetowy, obciążenia termiczne, siły wewnętrzne.

1. Wprowadzenie

Artykuł przedstawia tok postępowania przy określaniu wartości parcia ośrodka sypkiego na ściany analizowanej komory silosu, a także opisuje możliwy sposób uwzględnienia obciążeń termicznych oraz zjawiska skurczu. Ponadto praca prezentuje analizę porównawczą sił wewnętrznych w konstrukcji powłokowej bez uwzględnienia obciążeń termicznych i z uwzględnieniem tych obciążeń.

Obciążenia działające na silos to głównie: ciężar własny, ciężar urządzeń technologicznych, ciężar izolacji, a także obciążenia środowiskowe – wiatr oraz śnieg zalegający na przekryciu.

Należy pamiętać że podstawowym obciążeniem komory silosu jest parcie materiału sypkiego wywierane na dno i ściany. W wyniku działania sił parcia powstają poziome siły rozciągające w ścianach komory. W przypadku zbiorników prostopadłościennych, a także w miejscu działania parcia lokalnego w silosach walcowych, powstają znaczące poziome momenty zginające. Silosy na materiały sypkie zaliczają się do drugiej lub trzeciej kategorii geotechnicznej. Należy bezwzględnie przeprowadzić ich analizę jako obiektów współpracujących z podłożem gruntowym, zgodnie z normą PN-EN 1997-1:2008. *Eurokod 7. Projektowanie geotechniczne. Część 1: Zasady ogólne.* Ze względu na znaczące gabaryty oraz obciążenia przenoszone na grunt należy koniecznie uwzględnić możliwość wystąpienia nierównomiernego osiadania konstrukcji.

Poza wyżej wymienionymi obciążeniami występują jeszcze inne obciążenia i oddziaływania, których pominięcie na etapie analizy statycznej może doprowadzić

do niedoszacowania wartości sił wewnętrznych konstrukcji. Do grupy takich oddziaływań należy zaliczyć obciążenia termiczne, zjawiska skurczu i pęcznienia oraz obciążenia wyjątkowe, takie jak: pożary w strefach przyległych, eksplozje i uderzenia.

Obciążenia termiczne są szczególnie istotne w przypadku składowania materiałów w stanie podwyższonej temperatury (na przykład klinkier cementowy). Szczególną uwagę należy zwrócić na efekty termiczne (odkształcenia) wywołane różnicą temperatur zachodzącą pomiędzy konstrukcją silosu, a składowanym materiałem sypkim. Rzeczywiste rozkłady temperatur w ścianie i gorącym ośrodku sypkim w eksploatowanych silosach są zagadnieniem złożonym (Prusiel i Tomczuk, 2012). Zgodnie z zaleceniami normy PN-EN 1991-1-5. *Eurokod 1. Oddziaływania na konstrukcję. Część 1-5. Oddziaływania ogólne. Oddziaływania termiczne* należy obliczyć ΔT_M – różnicę temperatur na wewnętrznej i zewnętrznej powierzchni ściany oraz ΔT – różnicę temperatur między średnią temperaturą ściany a temperaturą, w której konstrukcja była wzniesiona. Obydwe wartości występują, gdy temperatura materiału sypkiego jest różna od temperatury zewnętrznej.

Dla obciążeń termicznych współczynnik obciążenia $\gamma_Q = 1,5$, a współczynnik kombinacyjny wynosi 0,6 według tablicy A.2. normy PN EN 1991-4:2006 *Eurokod 1. Oddziaływania na konstrukcję. Część 4: Silosy i zbiorniki.*

Ponadto, w ścianach mogą także występować różnice temperatur na wysokości komory spowodowane zróżnicowaniem nasłonecznienia (Buczowski i in., 1995), bądź różnicą temperatur składowanego materiału na wysokości.

* Autor odpowiedzialny za korespondencję. E-mail: radek.avo@gmail.com

Istotny wpływ na wartości sił wewnętrznych w silosach żelbetowych mają także odkształcenia wymuszone – skurcz i odkształcenia termiczne związane z samoociepniem betonu w czasie hydratacji cementu. Zjawisko samoociepniem betonu zachodzi w ciągu jednego do trzech dni po rozpoczęciu hydratacji, później mamy do czynienia ze stopniowym obniżeniem temperatury do temperatury otoczenia, a efekt tego ochłodzenia sumuje się z efektami skurczu. Zjawiska te są niekorzystne, ponieważ zachodzą, gdy beton nie osiągnął pełnej wytrzymałości na rozciąganie (Halicka, 2014).

Całkowite odkształcenie skurczowe ε_{cs} , określone zgodnie z *PN-EN 1992-1-1:2008 Eurokod 2. Projektowanie konstrukcji z betonu. Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków*, stanowi sumę dwóch składowych, odkształcenia skurczowego będącego wynikiem autogenicznego (samorodnego) odkształcenia skurczowego oraz skurczu wysychania.

2. Walcowy silos żelbetowy na klinkier cementowy – założenia obliczeniowe

2.1. Charakterystyka obiektu

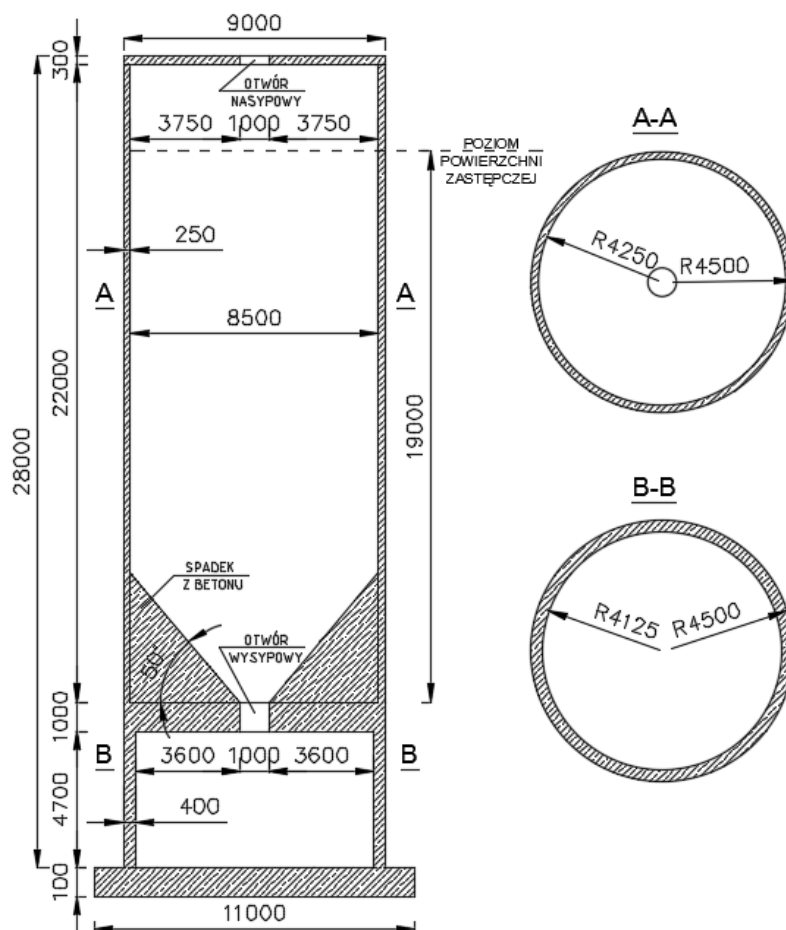
Silos na klinkier cementowy stanowi obiekt przeładunkowy przy istniejącym zakładzie wytwórczym

cementu (rys. 1). Parametry charakteryzujące obiekt:

- wysokość komory $h = 22,00$ m,
- średnica komory w osiach $d = 8,75$ m,
- rodzaj materiału sypkiego – klinkier cementowy, właściwości według tablicy E1 w *PN-EN 1991-4:2008 Eurokod 1. Oddziaływania na konstrukcje. Część 4: Silosy i zbiorniki*,
- temperatura składowanego materiału $t = 100^{\circ}\text{C}$,
- podłoże: na głębokości do 6,00 m poniżej poziomu terenu występuje piasek średni, mało wilgotny o $I_D = 0,40$; poniżej 6,00 m znajduje się glina zwięzła o $I_L = 0,35$. Wody gruntowej nie stwierdzono.

Wypalony klinkier (w temperaturze około 1450°C) przechodzi do chłodnika klinkieru, gdzie jest schładzany do temperatury rzędu 100°C . Tak przygotowany materiał trafia taśmociągiem do stacji przeładunkowej (komora silosu), skąd następnie transportowany jest do dalszej obróbki (przemiału) oraz procesów technologicznych. W projektowanej komorze silosu załadunek odbywa się w sposób grawitacyjny poprzez centralnie umieszczony otwór w płycie przekrycia. Opróżnianie komory silosu zaprojektowano jako centryczne przez otwór wysypowy o średnicy 100 cm, natomiast spadek w kierunku otworu wysypowego zaprojektowano z betonu.

Konstrukcję przekrycia stanowi monolityczna płyta kolista, swobodnie oparta na ścianach żelbetowych sprowadzonych do płyty fundamentowej o rzucie kwadratu. Ponadto, na poziomie 6 metrów powyżej płyty



Rys. 1. Przekrój pionowy oraz rzut silosu poddanego analizie

fundamentowej zaprojektowano dno komory silosu w postaci kolistej monolitycznej płyty żelbetowej, sztywno połączonej z konstrukcją ściany. W poziomie płyty dna komory występuje skokowa zmiana grubości ściany silosu z 25 cm na 40 cm, ze względu na konieczność zapewnienia odpowiedniej sztywności połączenia oraz przeniesienia obciążeń (rys. 1).

Na podstawie punktu 5.1(2) normy PN-EN 1991-4 stwierdzono, że rozpatrywany silos zalicza się do silosów smukłych. Według punktu 2.5(5) normy klasa oceny oddziaływań dla silosów powinna być określona z warunków pojedynczej jednostki składowania, stąd też na podstawie tablicy 2.1 normy przyjęto klasę oceny oddziaływań 2 (AAC 2).

Rodzaj przepływu określa się uwzględniając kąt połówkowy u wierzchołka lejki β oraz współczynnik tarcia o ścianę lejki μ_h ($\mu_{hd} = 0,414$). Według rysunku 4.1a PN-EN 1991-4 stwierdzono, że w rozpatrywanym przypadku jest zagwarantowany przepływ rdzeniowy.

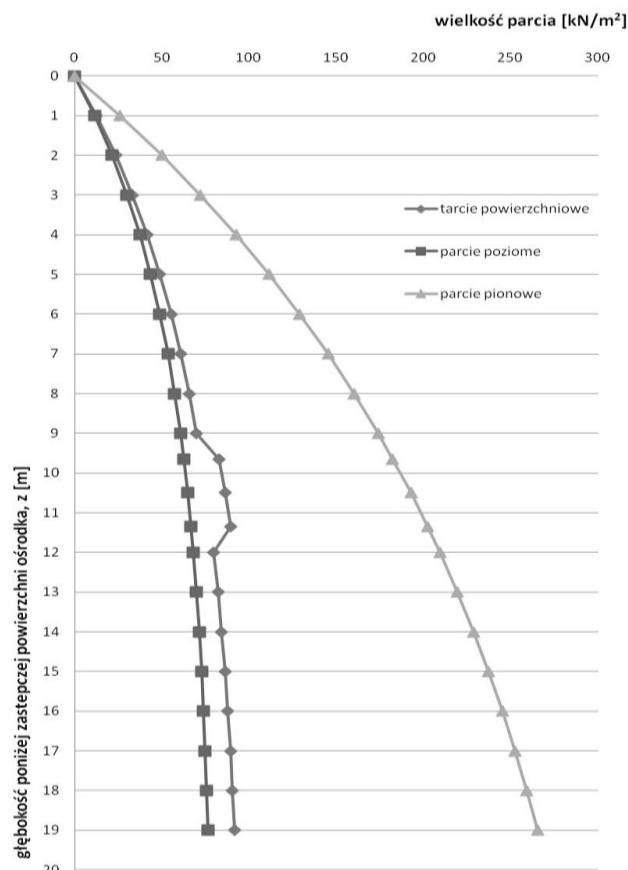
2.2. Parcie ośrodka sypkiego

Wyznaczenie oddziaływań na walcową komorę silosu przeprowadzono na podstawie normy PN-EN 1991-4. Oddziaływania na silosy zależne są od fazy eksploatacji zbiornika, to jest napełnianie (ośrodek sypki w ruchu), składowanie (ośrodek sypki w spoczynku) lub opróżnianie (ośrodek sypki częściowo/całkowicie w ruchu). Podczas określania wartości parcia na ściany silosu należy uwzględniać geometrię i konstrukcję silosu, właściwości składowanego ośrodka, rodzaje przepływu podczas procesu opróżniania, oraz wpływ mimośrodków usytuowania otworu nasypowego i wysypowego.

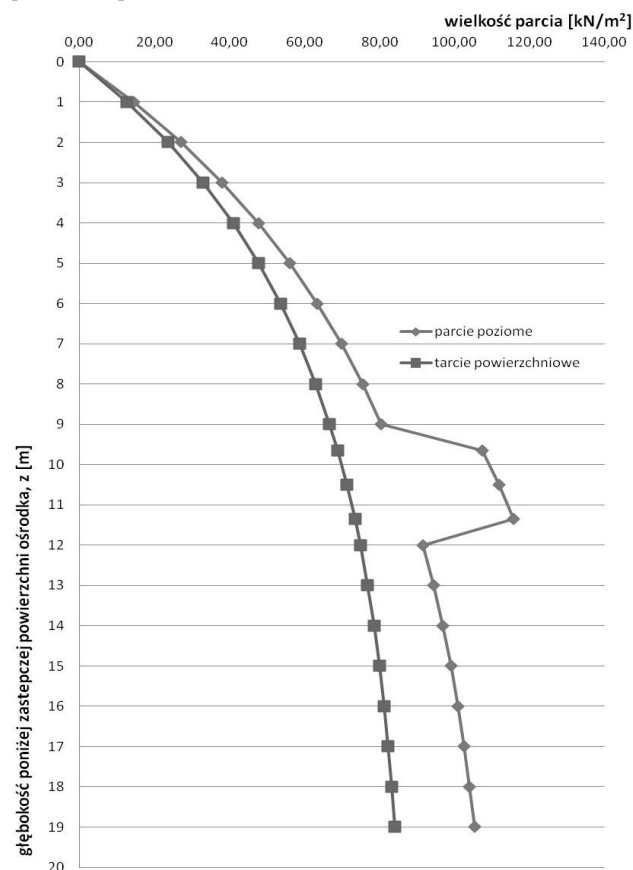
Zgodnie z zasadą z punktu 2.1(3) w PN-EN 1991-4 obciążenia na pionową ścianę silosu przy napełnianiu i opróżnianiu przez otwory na małych mimośrodkach ($e \leq 0,25 \cdot d_c$) należy ustalać jako symetryczne, z uzupełnieniem o obciążenia lokalne. Natomiast w przypadku dużego mimośrodu ($e > 0,25 \cdot d_c$), obciążenia należy traktować jako parcia rozłożone niesymetrycznie. Obliczenie obciążeń działających na ściany silosu po napełnieniu przeprowadza się według punktu 5.2.1 normy. Parcie symetryczne obliczane jest przy założeniach teorii Janssena.

W obliczeniach uwzględniono układ parcia lokalnego zależny od rodzaju konstrukcji silosu. Analizowana komora należy do silosów grubościennych (silosy betonowe), w których składową bazową parcia lokalnego po napełnieniu p_{pf} należy przyjąć za skierowaną na zewnątrz, przyłożoną na dwóch przeciwległych kwadratowych polach o boku $s \approx 0,2d_c$.

Na podstawie punktu 5.2.1.3(4) w PN-EN 1991-4 w kołowych silosach grubościennych zaliczanych do klasy oceny oddziaływań 2, zastosowano podejście uproszczone. Najbardziej niekorzystne ustawienie obciążenia założono w taki sposób, że będzie ono przypisane do strefy działania znajdującej w połowie wysokości komory silosu. Wartości parcia w analizowanym silosie przedstawiają rysunki 2 i 3.



Rys. 2. Wykres parcia klinkieru w analizowanej komorze silosu podczas napełnienia



Rys. 3. Wykres parcia klinkieru w analizowanej komorze silosu podczas opróżniania

2.3. Wyznaczenie obciążeń termicznych

W analizie uwzględniono efekty termiczne spowodowane różnicą temperatur pomiędzy składowanym ośrodkiem sytkim i konstrukcją silosu, a także wpływy skurczu zachodzącego w konstrukcji betonowej.

Rozkład temperatury w ścianie komory silosu określono stosując teorię przewodności cieplnej przytoczonej przez Halicką i Franczak (2011).

Temperaturę T_x na odcinku x od wewnętrznej powierzchni przekroju wyraża się wzorem:

$$T_x = T_{in} - \frac{R_x}{R_{tot}} \cdot (T_{in} - T_{out}) \quad (1)$$

gdzie: T_x jest temperaturą wewnętrzną (składowanego materiału), $T_{in} = 100^\circ\text{C}$, natomiast R_{tot} jest całkowitym oporem cieplnym elementu z uwzględnieniem oporu obu powierzchni, wyrażonym wzorem:

$$R_{tot} = R_{in} + \sum_i \frac{h_i}{\lambda_i} + R_{out} \quad (2)$$

gdzie: T_{out} jest temperaturą środowiska zewnętrznego, $T_{out} = -28,6^\circ\text{C}$ według rysunku NB.2 oraz NB.3 PN-EN 1991-4, R_{in} jest oporem przyjmowania ciepła na powierzchni wewnętrznej, $R_{in} = 0,13 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$, h_i jest grubością warstwy i , $h_i = 25 \text{ cm}$, λ_i jest współczynnikiem przewodzenia ciepła dla betonu o ciężarze objętościowym $25 \text{ kN}/\text{m}^3$, $\lambda_i = 1,71 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, R_{out} jest oporem przyjmowania ciepła na powierzchni zewnętrznej, $R_{out} = 0,04 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$, a R_x jest oporem cieplnym na powierzchni wewnętrznej i elementu od powierzchni wewnętrznej powyżej punktu x , wyrażonym wzorem:

$$R_x = R_{in} + \sum_i \frac{h_i}{\lambda_i} \quad (3)$$

Zatem różnica temperatur na grubości ściany jest równa:

$$\Delta T_M = |T_1 - T_2| \quad (4)$$

a jej wartość kombinacyjna:

$$\Delta T_{M,d} = 0,6 \cdot \Delta T_M \quad (5)$$

Średnia temperatura ściany jest równa:

$$\overline{\Delta T}_d = T_1 - \frac{\Delta T_M}{2} \quad (6)$$

Założono temperaturę początkową $T_0 = 15^\circ\text{C}$. W tej sytuacji różnica między temperaturą pracy konstrukcji, a temperaturą początkową wynosi:

$$\Delta T = \overline{\Delta T}_d - T_0 \quad (7)$$

a jej wartość kombinacyjna:

$$\Delta T_d = 0,6 \cdot \Delta T \quad (8)$$

Obliczenia przeprowadzono dla warunków zimowych oraz letnich. Przeanalizowano przypadki bez uwzględnienia warstwy tłumiącej.

2.4. Skurcz betonu

Obliczenie odkształceń skurczowych przeprowadzono według punktu 3.1.4. PN-EN 1992-1-1. Końcowa wartość odkształcenia skurczowego spowodowana wysychaniem wynosi zatem:

$$\varepsilon_{cd,\infty} = \varepsilon_{cd,0} \cdot k_h \quad (9)$$

gdzie: $\varepsilon_{cd,0}$ jest nominalną wartością skurczu swobodnego spowodowaną wysychaniem, $\varepsilon_{cd,0} = 0,027\%$, a k_h jest współczynnikiem zależnym do miarodajnego wymiaru h_0 , $k_h = 0,80$.

Wartość odkształcenie skurczu autogenicznego wyrażona jest wzorem:

$$\varepsilon_{ca}(t) = \beta_{as}(t) \cdot \varepsilon_{ca}(\infty) \quad (10)$$

gdzie:

$$\beta_{as}(t) = 1 - \exp(-0,2 \cdot t^{0,5}) \quad (11)$$

$$\varepsilon_{ca}(\infty) = 2,5 \cdot (f_{ck} - 10) \cdot 10^{-6} \quad (12)$$

$t = 28$ dni, $f_{ck} = 30 \text{ MPa}$.

Zatem wartość sumarycznego odkształcenia końcowego wywołanego skurczem wynosi:

$$\varepsilon_{cs} = \varepsilon_{cd,\infty} + \varepsilon_{ca} \quad (13)$$

Współczynnik obliczeniowy skurczu wynosi 1,0 według PN-EN 1992-1-1, natomiast wartość współczynnika kombinacyjnego dla skurczu wynosi 0,7.

Efekt skurczu został zamodelowany w konstrukcji poprzez spadek temperatury w stosunku do temperatury początkowej. Równoważną różnicę temperatur obliczono według wzoru:

$$\varepsilon_{cs} = \alpha_t \cdot \Delta t \rightarrow \Delta t = \frac{\varepsilon_{cs}}{\alpha_t} \quad (14)$$

gdzie α_t jest współczynnikiem rozszerzalności termicznej betonu, $\alpha_t = 1 \cdot 10^{-5} \text{ 1/deg}$.

Obliczone oraz przyjęte do analizy wartości obciążeń termicznych oraz odkształceń skurczowych zawiera tabela 1.

Tab. 1. Zestawienie wartości kombinacyjnych oddziaływań termicznych i skurczowych

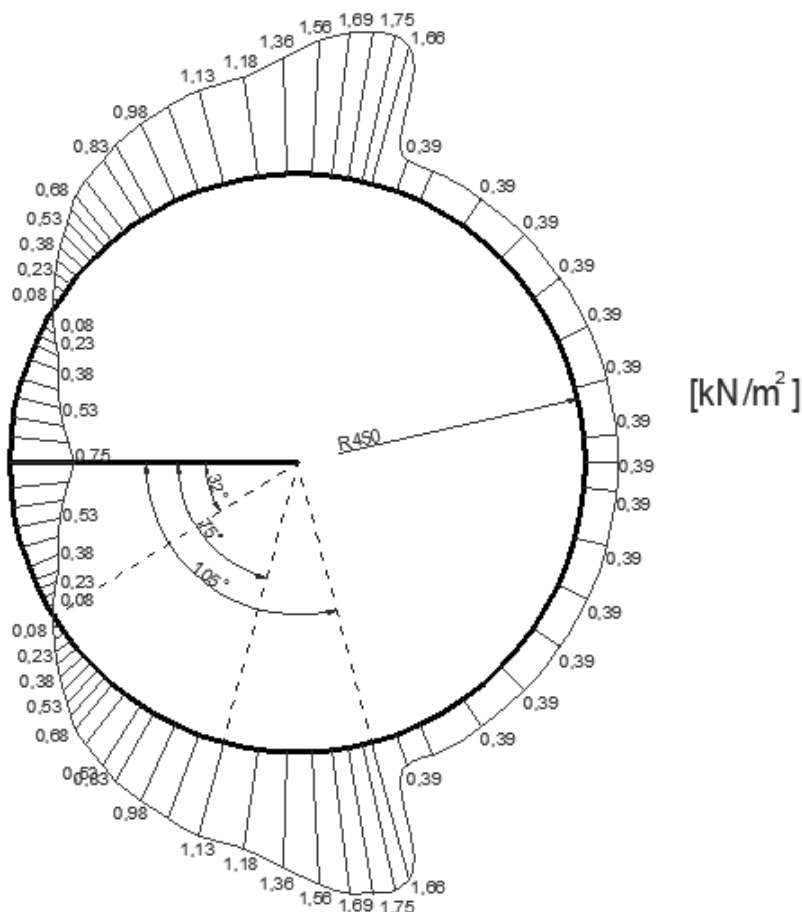
Oddziaływania	Zima	Lato
Różnica temperatur wewnętrznej i zewnętrznej powierzchni ściany $\Delta T_{m,d}$ bez uwzględnienia warstwy tłumiącej	36,2°C	12,4°C
Różnica między temperaturą pracy konstrukcji a temperaturą początkową + różnica temperatur wynikająca ze skurczu betonu	1,6 + (-17,5) = -15,9°C	33,5 + (-17,5) = 16°C

2.5. Wyznaczenie pozostałych obciążeń.

Obciążenie śniegiem ustalono na podstawie normy PN-EN 1991-1-3 *Eurokod 1: Oddziaływania na konstrukcje. Część 1-3: Oddziaływania ogólne. Obciążenie śniegiem* z uwzględnieniem stref obciążeń śniegiem w Polsce. Wartość obciążenia wiatrem na ściany komory silosu (rys. 4) obliczono dla liczby Reynoldsa $Re = 2,08 \cdot 10^7$, zgodnie z zasadami zawartymi w punkcie 7.9 normy PN-EN 1991-1-4 *Eurokod 1: Oddziaływania na konstrukcje. Część 1-4: Oddziaływania ogólne. Oddziaływania wiatru*. Oddziaływania użytkowe określono na podstawie PN-EN 1991-1-2 *Eurokod 1: Oddziaływania na konstrukcje. Część 1-2: Oddziaływania ogólne. Oddziaływania na konstrukcje w warunkach pożaru*. Obciążenia zewnętrzne oddziałujące na konstrukcję przedstawiono w formie tabeli 2.

Tab. 2. Zestawienie obciążeń

Obciążenia	Nazwa obciążenia
1	Ciężar własny
2	Obciążenia stałe
3	Obciążenie śniegiem
4	Obciążenie użytkowe
5	Obciążenie wiatrem
6	Obciążenie termiczne– zima
7	Napełnienie – parcie poziome
8	Napełnienie – parcie styczne
9	Napełnienie - parcie pionowe
10	Opróżnianie – parcie poziome
11	Opróżnianie – parcie styczne
12	Obciążenie termiczne – lato
13	Skurcz



Rys. 4. Rozkład parcia wiatru na ściany komory silosu

3. Przestrzenny model konstrukcji

3.1. Model obliczeniowy

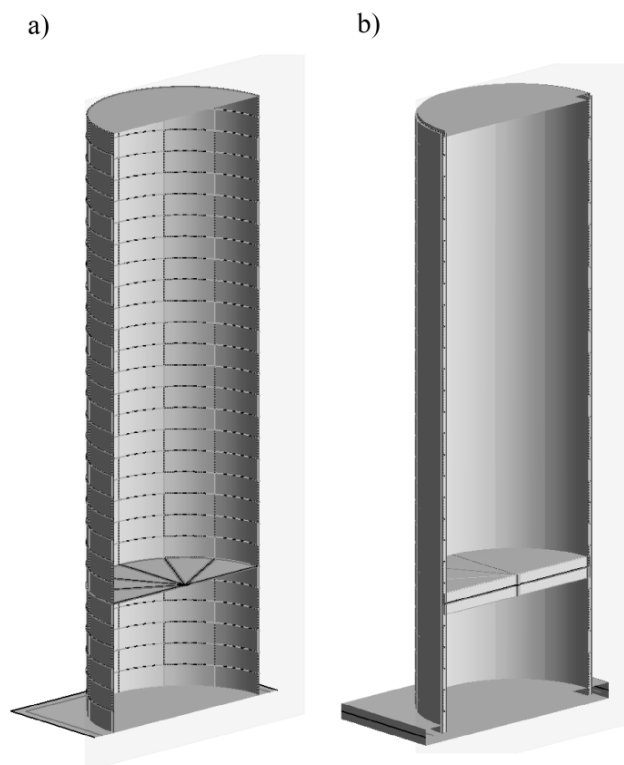
W celu przedstawienia wpływu obciążeń termicznych przeprowadzono analizę rozkładu sił wewnętrznych w ścianach komory silosu walcowego.

Siły wewnętrzne w komorze silosu wyznaczono przy użyciu programu numerycznego Autodesk Robot Structural Analysis Professional 2014. Ściany zamodelowano jako elementy powłokowe rodzaju „panel”. W celu odzwierciedlenia rzeczywistego rozkładu obciążenia od parcia materiału sypkiego oraz obciążenia wiatrem ściany silosu podzielono na 28 segmentów – pierścieni o wysokości 1,00 m i grubości 25 cm lub 40 cm, które składają się z 12 zakrzywionych paneli (rys. 5). Dokonano dyskretyzacji modelu obliczeniowego otrzymując elementy skończone o wymiarach 0,25 m × 0,50 m. Dogęszczono siatkę MES w obszarach istotnych według autora – miejsce przyłożenia obciążenia lokalnego, połączenie ścian z płytą dna komory oraz z płytą fundamentową (rys. 6). Siły wewnętrzne obliczono wykorzystując Metodę Elementów Skończonych (MES). Ze względu na monolityczne połączenie ścian komory silosu z dnem mamy do czynienia ze stanem zgięciowym (spowodowany brakiem swobody odkształceń), co determinuje powstanie znacznych wartości momentów zginających w walcowych ścianach komory. Warto pamiętać, że w przypadku obliczeniowego umieszczenia parcia lokalnego w połowie wysokości ścian silosu i obliczeniu wartości momentów zginających, należy następnie proporcjonalnie do wartości tych momentów obliczyć momenty na pozostałych poziomach. Uzyska się wtedy obwiednię sił wewnętrznych – wartości ekstremalne (nie można takiego uproszczenia zastosować w strefie dolnej, gdzie dominują momenty zamocowania). Przedstawiony na rysunkach 7 i 8 wykres nie stanowi obwiedni momentów zginających, niemniej jednak jest podstawą do jej wyznaczenia.

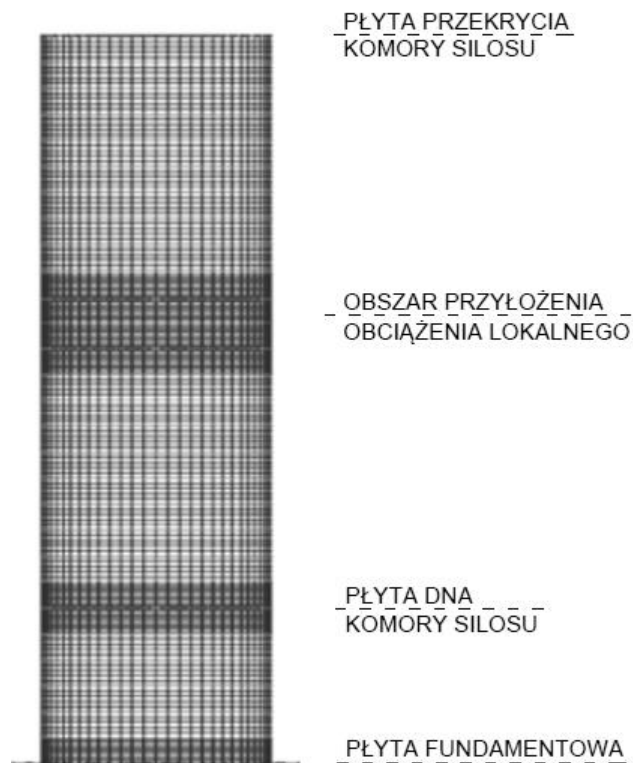
3.2. Kombinacje oddziaływań

W analizie stałe kombinacje oddziaływań zostały przyjęte na podstawie reguły kombinacji oddziaływań zawartych w PN-EN 1991-4. Jako wiodące obciążenie zmienne uwzględniono parcie przy opróżnianiu lub napełnianiu. Należy zauważyć, iż zgodnie z punktem 3.3 (4) normy jeśli jest zagwarantowany wypływ rdzeniowy, wtedy można w ogóle nie rozważać parcia przy opróżnianiu. Zatem autor uzyskał nieco zawyżone wartości, które są miarodajne do wymiarowania (PN EN 1991-4, tab. A.2 oraz tab. A.5).

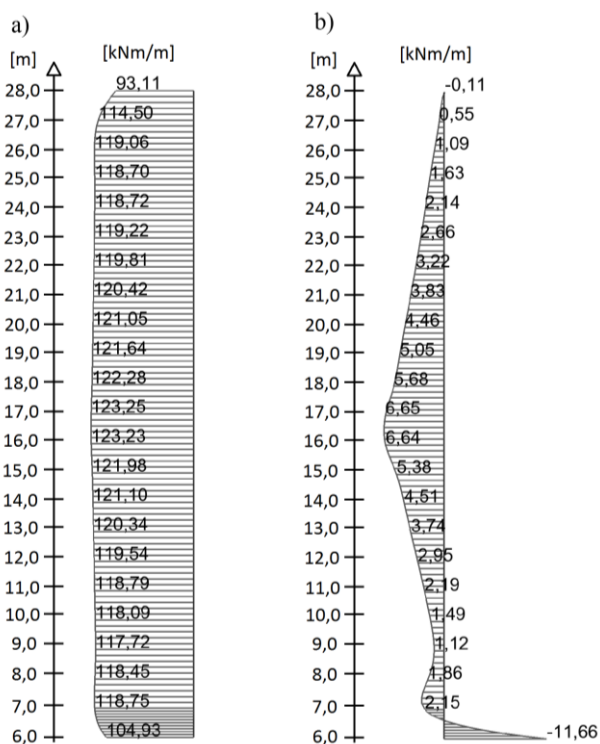
Przyjęte kombinacje w stanach granicznych nośności (SGN) oraz użyteczności (SGU) przedstawia tabela 3. Nazwa kombinacji odpowiada towarzyszącemu obciążeniu zmiennemu. Na podstawie analizy sił wewnętrznych w komorze silosu stwierdzono, że najbardziej niekorzystną kombinacją w stanie granicznym nośności jest kombinacja numer 1, natomiast w stanie granicznym użyteczności kombinacja numer 6.



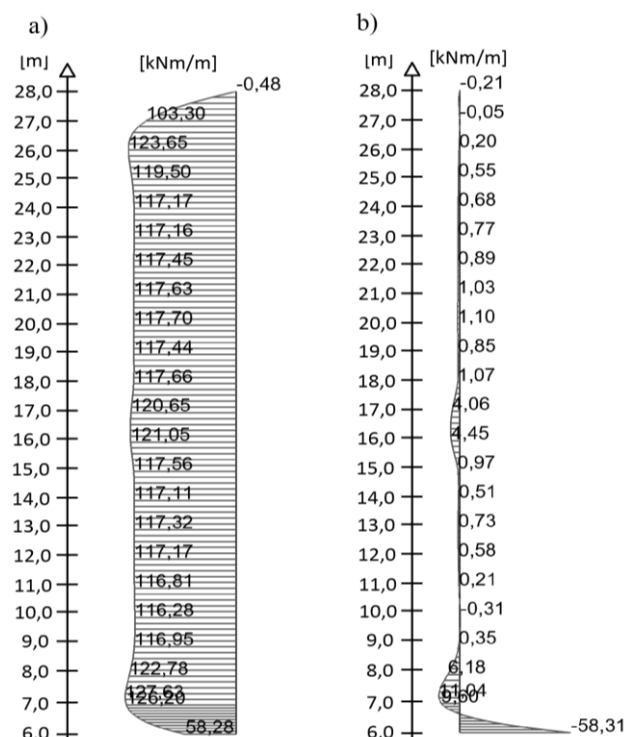
Rys. 5. Model silosu zaprojektowany w programie Robot Structural Analysis Professional 2014: a) przekrój konstrukcji z podziałem na „panele”, b) przekrój konstrukcji z uwzględnieniem grubości „paneli”



Rys. 6. Siatka metody elementów skończonych – ściany silosu walcowego



Rys. 7. Rozkład równoleżnikowych momentów zginających w ścianie komory silosu, w przypadku działania obciążenia lokalnego w połowie wysokości silosu: a) z uwzględnieniem wpływu obciążeń termicznych, b) bez uwzględnienia wpływu obciążeń termicznych



Rys. 8. Rozkład południkowych momentów zginających w ścianie komory silosu, w przypadku działania obciążenia lokalnego w połowie wysokości silosu: a) z uwzględnieniem wpływu obciążeń termicznych, b) bez uwzględnienia wpływu obciążeń termicznych

Tabela 3. Zestawienie kombinacji obciążeń dla stanów granicznych nośności oraz użyteczności

Numer	Nazwa	Typ	Kombinacja obciążeń
1	D – opróżnianie	SGN	$(1+2) \cdot 1,35 + (10+11+9) \cdot 1,50 + (3+5+6) \cdot 1,50 \cdot 0,60$
1*	D – opróżnianie bez obciążeń termicznych	SGN	$(1+2) \cdot 1,35 + (10+11+9) \cdot 1,50 + (3+5) \cdot 1,50 \cdot 0,60$
2	S – śnieg	SGN	$(1+2) \cdot 1,35 + (7+8+9) \cdot 1,50 + 3 \cdot 1,50 \cdot 0,60 + 13 \cdot 1,50 \cdot 0,70$
3	WF – wiatr i silos pełny	SGN	$(1+2) \cdot 1,35 + (7+8+9) \cdot 1,50 + 5 \cdot 1,50 \cdot 0,60 + 13 \cdot 1,50 \cdot 0,70$
4	WE – wiatr i silos pusty	SGN	$(1+2) \cdot 1,35 \cdot 0,9 + 5 \cdot 1,50 \cdot 0,60 + 13 \cdot 1,50 \cdot 0,70$
5	T – termiczne	SGN	$(1+2) \cdot 1,35 + (7+9+8) \cdot 1,50 + 6 \cdot 1,50 \cdot 0,60 + 13 \cdot 1,50 \cdot 0,70$
6	D – opróżnianie	SGU	$(1+2) \cdot 1,00 + (9+10+11) \cdot 0,90 + (3+5+6) \cdot 0,60 + 13 \cdot 0,70$
7	S – śnieg	SGU	$(7+8+9) \cdot 0,90 + 3 \cdot 0,60 + 13 \cdot 0,70 + (1+2) \cdot 1,00$
8	WF – wiatr i silos pełny	SGU	$(7+8+9) \cdot 0,90 + 5 \cdot 0,60 + 13 \cdot 0,70 + (1+2) \cdot 1,00$
9	WE – wiatr i silos pusty	SGU	$5 \cdot 0,60 + 13 \cdot 0,70 + (1+2) \cdot 1,00$
10	T – termiczne	SGU	$(7+8+9) \cdot 0,90 + 6 \cdot 0,60 + 13 \cdot 0,70 + (1+2) \cdot 1,00$

4. Analiza sił wewnętrznych w ścianie silosu

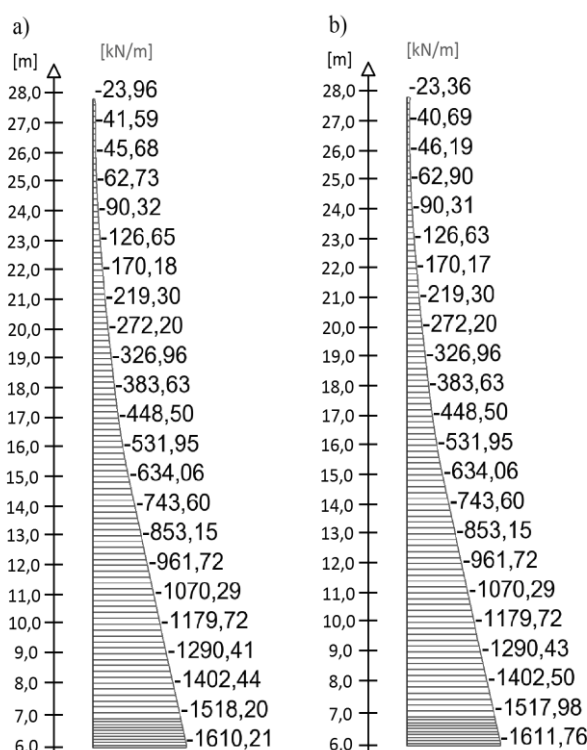
W celu określenia wpływu działania obciążenia termicznego przeprowadzono analizę porównawczą wartości sił wewnętrznych w konstrukcji z uwzględnieniem wpływu działania wysokiej temperatury oraz w sytuacji bez jej uwzględniania. Wyniki analizy przedstawiono poniżej.

W przypadku porównania wartości sił południkowych (rys. 9) nie zauważono znaczącego wpływu obciążeń termicznych na rozkład sił wewnętrznych, różnice procentowe wartości nie przekraczały 0,5%. Analiza rozkładu sił równoleżnikowych (rys. 10) wykazuje znaczny wpływ obciążeń termicznych, głównie w obszarach połączenia z płytą dna komory. Uwzględnienie wpływu podwyższonej temperatury materiału sypkiego spowodowało zwiększenie równoleżnikowej siły ściskającej w obrębie zamocowania ścian komory (rys. 10a) oraz w okolicach oparcia płyty przekrycia, w miejscu niewystępowania parcia materiału sypkiego. Jednakże najistotniejsze zmiany są zauważalne w rozkładzie sił wewnętrznych konstrukcji powłokowej w przypadku analizy momentów zginających na wysokości komory.

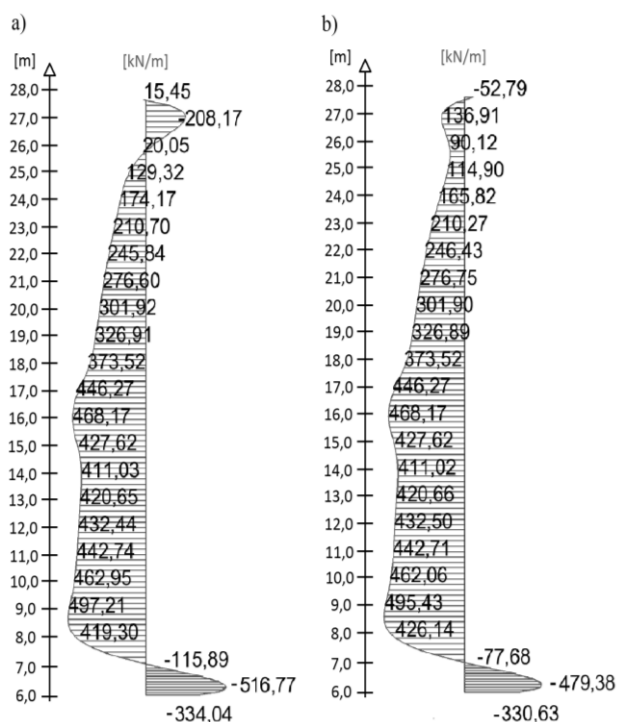
Przy nieuwzględnieniu obciążeń termicznych (rys. 7b i 8b) otrzymujemy rozkład momentów zginających (równoleżnikowych oraz południkowych) charakterystyczne dla stanu zgięciowego w powłokach walcowych. Obserwujemy znaczne wartości momentów w strefie połączenia ścian z dnem komory, wynikające z zaburzeń warunków brzegowych, oraz wygaszanie momentów zginających na wysokości komory z uwzględnieniem parcia lokalnego. Obciążenia termiczne prowadzą do powstania znaczących wartości momentów zginających na wysokości komory silosu (rys. 7a i 8a) powodując dodatkowe zginanie w płaszczyźnie równoleżnikowej i południkowej.

5. Wnioski

- Przedstawiona analiza rozkładu wartości sił wewnętrznych wskazała wpływ działania obciążeń termicznych na rozkład sił wewnętrznych w komorze silosu walcowego. Oddziaływania termiczne zwiększają w znaczącym stopniu wartość momentów zginających zarówno południkowych, jak i równoleżnikowych powodując stan zgięciowy na całej wysokości ścian komory.
- Oddziaływania termiczne nie wpływają na wartości sił południkowych występujących w powłoce, jednakże mają znaczenie na wartość sił równoleżnikowych – szczególnie w obszarze połączenia ścian komory z płytą dna.
- Nieuwzględnienie na etapie projektowania oddziaływań termicznych skutkuje istotnym z punktu widzenia pracy konstrukcji niedoszacowaniem wartości momentów zginających oraz sił równoleżnikowych i może prowadzić do jej zniszczenia,



Rys. 9. Rozkład sił południkowych w ścianie komory silosu, w przypadku działania obciążenia lokalnego w połowie wysokości silosu: a) z uwzględnieniem wpływu obciążeń termicznych, b) bez uwzględnienia wpływu obciążeń termicznych



Rys. 10. Rozkład sił równoleżnikowych w ścianie komory silosu, w przypadku działania obciążenia lokalnego w połowie wysokości silosu: a) z uwzględnieniem wpływu obciążeń termicznych, b) bez uwzględnienia wpływu obciążeń termicznych

bądź też przekroczenia stanu granicznego użyteczności.

- W przypadku konstrukcji powłokowych obciążenia termiczne mają decydujący wpływ na wartości sił wewnętrznych, a w konsekwencji na grubość elementów oraz przekrój zbrojenia.

Literatura

- Buczowski W., Czwojdziański Z., Staszewski R. (1995). Wpływ nasłonecznienia na pracę statyczną konstrukcji skrzyniowych. *Inżynieria i Budownictwo*, 7-8/1995.
- Halicka A. (2014). Specyfika projektowania zbiorników na ciecze. *Inżynier Budownictwa*, 12/2014, s. 8.
- Halicka A., Franczak D. (2011). Projektowanie zbiorników żelbetowych. T.1, zbiorniki na materiały sypkie. *Wydawnictwo naukowe PWN*, Warszawa.
- Prusiel J.A., Tomczuk K. (2012). Efekty sprężania parcia statycznego i pól temperatury w żelbetowych silosach na gorący ośrodek sypki. *Przegląd budowlany*, 4/2012, 53-57.

THE EFFECT OF TEMPERATURE OF THE STORED BULK MATERIAL ON THE INTERNAL FORCES IN THE WALLS OF THE CYLINDRICAL CHAMBER

Abstract: Distribution of internal forces depends on many factors: permanent and variable loads, including often ignored in the calculation the effect of thermal loads. The purpose of the paper is to analyse the impact of high temperature on the internal forces in the walls of the cylindrical silo. The supporting structure has been modelled in Autodesk Robot Structural Analysis programme. Walls of the silo are loaded with the thrust of bulk material (filling and emptying) considering the temperature. The numerical analysis was conducted using the method specified in the European standards. The results showed a significant influence of temperature on the distribution of forces in the chamber of the cylindrical silo. Failure due to thermal influences can cause damage to supporting structure designed object.