

Uwagi do europejskiej normy PN-EN 1991- 4:2008 dotyczącej obciążeń w silosach

Prof. dr hab. inż. Andrzej Łapko, Politechnika Białostocka

1. Wprowadzenie

Zbiorniki na ośrodki sypkie podlegają awariom o wiele częściej niż inne obiekty budownictwa przemysłowego. Najczęściej towarzyszą im nadmierne odkształcenia (w przypadku silosów żelbetowych wywołane zarysowaniem), jednak dość często notowane są przypadki katastrofalnych uszkodzeń prowadzących do całkowitego zniszczenia konstrukcji, z ofiarami w ludziach włącznie. Główne przyczyny prowadzące do awarii i katastrof silosów leżą w błędach wykonawczych i eksploatacyjnych, ale także często wskazuje się na błędy projektowo-obliczeniowe [1], [2].

Metody projektowania konstrukcji silosów i zbiorników na ciecze są jednak ciągle doskonalone, na podstawie prowadzonych na dużą skalę badań doświadczalnych i studiów teoretycznych, w tym także poprzez symulacje komputerowe. Dzięki wynikom tych badań w wielu krajach aktualizowane są także normy i przepisy projektowania w tym zakresie.

Najmniej rozpoznany aspekt projektowania silosów są obciążenia dynamiczne (lub na przemian statyczne i dynamiczne) wywołane przepływającym materiałem sypkim. Szczególnie słabo rozpoznane są zmienne w funkcji czasu rozkłady parcia silosowego wywołane mimośrodowym kanałem przepływu, co może mieć miejsce w przypadku opróżniania przez otwór wysypowy umieszczony mimośrodowo względem osi pionowej komory silosu. Przeprowadzono wiele prac badawczych i teoretycznych w tym zakresie [2], [3]. Jednak rezultaty tych analiz charakteryzują się dużymi rozrzutami, a zatem kształt i lokalizacja kanału przepływu w takim silosie powinny być traktowane jako zmienne losowe.

Ustalając założenia obliczeniowe konstrukcji silosu projektant musi mieć pełną świadomość kombinacji obciążeń wywołanych ośrodkiem sypkim, ich lokalnych rozkładów i sposobu ich przejmowania przez konstrukcję z uwzględnieniem jej podatności i charakteru oddziaływań: statycznych lub dynamicznych.

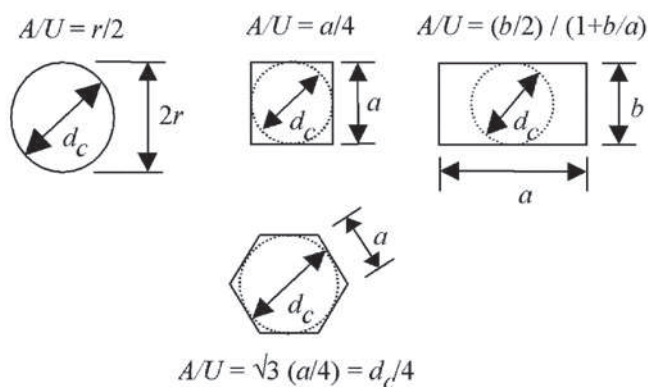
Spośród najbardziej dyskusyjnych efektów obciążeń na konstrukcje silosów cylindrycznych należy wymienić wpływ momentów zginających w płaszczyznach obwodowych i pionowych cylindrycznej ściany. Przy przepływie ośrodka sypkiego o schemacie osiowo-symetrycznym zginanie powłoki ściany jest z reguły wywołane lokalnymi (miejscowymi) odchyłkami od osiowo-symetrycznego rozkładu obciążeń wywołanych parciem silosowym. W przypadku niesymetrycznego kanału przepływu ośrodka sypkiego (przy mimośrodowym opróżnianiu), błędnie ocenione wpływy zginania ścian cylindrycznych były przyczyną wielu uszkodzeń ścian silosów [1], [4].

Inne stany obciążeń, pomijane w normach projektowania silosów związane są z drganiami wzbudzonymi podczas przepływu ośrodka sypkiego (drżania konstrukcji wzbudzone samoistnie), a także oddziaływaniami na składowane ośrodki sypkie pół temperatury i wilgotności, które to zjawiska mogą być przyczyną wzrostu parcia silosowego [3].

W niniejszym artykule przedstawiono uwagi do wybranych rozwiązań normy europejskiej PN-EN 1991-4:2008 [8] w zakresie obliczania obciążeń w silosach. Dotyczą one zasad określania obciążeń lokalnych, parcia silosowego przy mimośrodowym opróżnianiu oraz parcia wywołanego zjawiskami termicznymi w silosie.

2. Uwagi ogólne do zakresu normy PN-EN 1991-4:2008

Norma europejska dotycząca obciążeń w silosach i zbiornikach na ciecze [8] powstawała przez wiele lat, kolejne jej projekty były udoskonalane w miarę pojawiania się nowych wyników badań i analiz. W porównaniu do wcześniejszych zapisów, finalna wersja Eurokodu z roku 2006 uwzględniła wiele postulatów badaczy. Zaletą podanych w Eurokodzie 1-4 rozwiązań jest m.in. uwzględnienie aspektów niezawodności. W tym zakresie dokonano klasyfikacji silosów pod względem oceny ryzyka awarii (określając klasy oceny oddziaływań), uwzględniono niepewność rozkładów wartości parametrów wpływają-



Rys. 1. Kształty przekrojów silosów wolnostojących uwzględnionych w Eurokodzie 1–4

cych na parcie silosowe, założono swobodny charakter rozkładu parcia lokalnego (ma być ono traktowane jako obciążenie nieumiejscowione), założono losowość kształtu niesymetrycznego kanału przepływu przy opróżnianiu mimośrodowym.

W normie zabrakło jednak odniesień do wielu zagadnień projektowania. W pierwszej kolejności należy tu zauważyć brak zasad wyznaczania obciążeń w układach silosów zblokowanych (bateriach silosowych cylindrycznych i prostopadłościennych). Pominięto występujące w niektórych silosach efekty dynamiczne, jak: drgania, uderzenia, dudnienie, uznając, że powyższe zjawiska są niewystarczająco zbadane. Niektóre istotne zjawiska lub sytuacje projektowe zostały w Eurokodzie zapisane kilkudziesięciu założeniami upraszczającymi, cyt. p. 3.3.: (8): „Gdy silos ma wiele otworów wysypowych a projekt technologii przewiduje ich używanie w określony sposób, przypadki te powinny być traktowane jako podstawowe sytuacje obliczeniowe. Inne warunki i kombinacje używania otworów wysypowych powinny być traktowane jako sytuacje wyjątkowe”.

W p. 5.3.4. normy omówiono zatem rozkład parcia przy opróżnianiu wyłącznie przez jeden otwór usytuowany mimośrodowo. Zabrakło jednak odniesień do sytuacji, gdy w silosie używanych jest jednocześnie kilka otworów wysypowych.

Inne szczegółowe ograniczenia przyjęte w Eurokodzie 2 zestawiono niżej:

- Kształty przekrojów poprzecznych silosu ograniczono do rozwiązań pokazanych na rysunku 1.
- Zastosowano ograniczenia wymiarów geometrycznych konstrukcji silosu (h_b oznacza całkowitą wysokość komory, wraz z wysokością leja):

$$h_b < 100 \text{ m}, \quad d_c < 60 \text{ m}, \quad h_b/d_c < 10 \quad (1)$$

- Założono, że silos nie będzie wyposażony w wewnętrzne urządzenia, takie jak wkładki centrujące stożkowe lub ostrosłupowe z wierzchołkiem wyniesionym ku górze, belki poprzeczne i inne urządzenia wewnątrz komory.

- Rozważono wyłącznie silosy mające leje stożkowe (tj. osiowo-symetryczne), ostrosłupowe na planie kwadratu lub klinowe.

- Przyjęto także następujące ograniczenia dotyczące ośrodka sypkiego:

- silos jest projektowany na określony zakres właściwości ośrodka sypkiego;
- składowany ośrodek sypki jest swobodnie płynący lub też można zagwarantować, że w projektowanym zbiorniku wystąpi przepływ swobodny ośrodka;
- maksymalna średnica cząstki składowanego ośrodka sypkiego nie przekracza wymiaru $0,03d_c$ (rys. 1).

W kolejnych punktach pracy przedyskutowano podane w Eurokodzie 1–4 wybrane zasady i reguły projektowania silosów, dotyczące szczególnych zagadnień w omawianym zakresie. Zaproponowano uściślenia zapisów, obejmujące przypadki projektowe pominięte w Eurokodzie 1–4.

3. Parcie lokalne w silosie

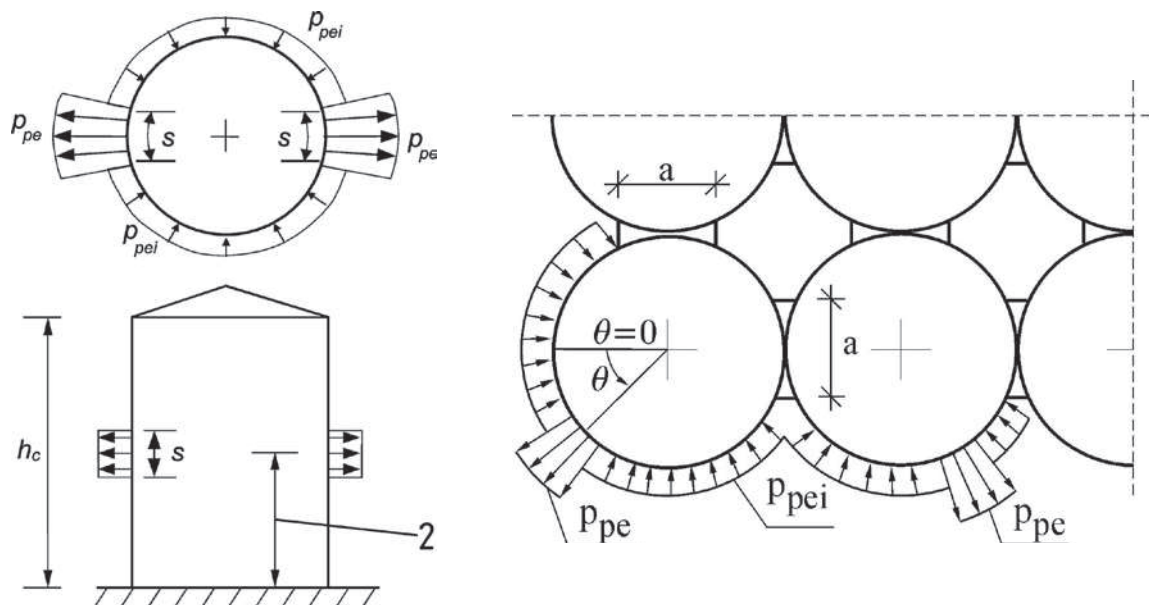
Zgodnie z zasadami normy europejskiej, obciążenie lokalne przy napełnianiu lub opróżnianiu silosu przyjmuje się łącznie z obciążeniem równomiernie rozłożonym na obwodzie w celu uwzględnienia przypadkowych asymetrii parcia silosowego podczas napełniania lub opróżniania, jak również odchyłek wynikających z mimośrodków otworów nasypowych i wysypowych. Ma to na celu zapewnienie konstrukcji ściany możliwości przeniesienia momentów zginających w powłokach cylindrycznych (lub dodatkowych momentów zginających w silosach o rzucie prostokątnym). Koncepcja obciążeń lokalnych w silosie wolnostojącym została opisana m.in. w pracach [4], [5] jako obciążenie nieumiejscowione, w postaci dwu działających w kierunku zewnętrznym ściany składowych parcia p_{pe} , przyłożonych na powierzchni kwadratu o boku s (rys. 2a):

$$s = \pi d_c / 16 \cong 0,2d_c \quad (2)$$

Obciążenie to pozostaje w równowadze statycznej z dodatkową składową p_{pei} parcia równomiernie rozłożonego na obwodzie, skierowanego do wewnątrz, działającego na obwodzie pasa o wysokości s . Układ dla wolnostojącej komory pokazano na rysunku 2.

Składowa „na zewnątrz” parcia lokalnego p_{pe} w Eurokodzie 1–4 zapisana jest wzorem:

$$p_{pe} = 0,42C_{op} \left[1 + 8 \left(\frac{e_{\max}}{d_c} \right)^2 \right] \cdot \left[1 - e^{-1,5 \left(\frac{h_c}{d_c} - 1 \right)} \right] \cdot p_{he} \quad (3)$$



Rys. 2. Schematy obciążenia lokalnego w grubościennych komorach wolnostojących: a) w komórce pojedynczej wg EC1-4 [8], b) w komorach zblokowanych wg pracy [5]

gdzie: C_{op} – współczynnik bazowy obciążenia lokalnego, określany eksperymentalnie
 e_{max} – maksymalny mimośród opróżniania
 p_{he} – parcie przy opróżnianiu.
 Składową „do wewnątrz” p_{pei} w przypadku wolnostojącego silosu cylindrycznego należy określać ze wzoru (3) wyprowadzonego na podstawie równowagi obu składowych na obwodzie kolistej komory silosu (wartość współczynnika β określono jako równą 7).

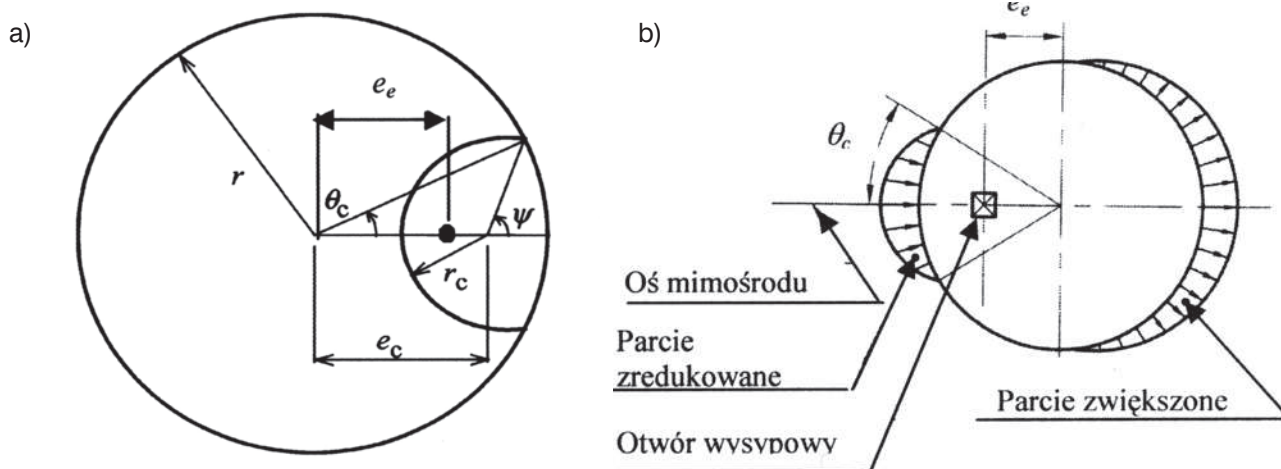
$$p_{pei} = \frac{1}{\beta} p_{pe} \quad (4)$$

Dla silosów cylindrycznych zestawionych w układach

baterijnych w EC 1-4 [8], brak jest jakichkolwiek wskazań w zakresie sposobu określenia rozkładu parcia lokalnego. Na rysunku 2b przedstawiono własną koncepcję umiejscowienia parcia lokalnego w takim przypadku, opisaną w pracy [5]. Wychodząc z równowagi składowych parcia „na zewnątrz” i „do wewnątrz”, wartość współczynnika β do wzoru (4) wyrażono wzorem:

$$\beta = 1,25 \pi \left[k - \frac{1}{45} \arctg \left(\frac{a}{d_c} \right) \right] - 1 \quad (5)$$

We wzorze (5) wielkość a oznacza długość łukowego pasma ściany komory rozważanej i komory przylegającej (rys. 2b), zaś wskaźnik k zależy od lokalizacji



Rys. 3. Niecentryczny kanał przepływu przy opróżnianiu mimośrodowym: a) model wg EC 1-4 [8], b) model wg normy australijskiej [9] e_c – mimośród kanału przepływu, e_e – mimośród otworu wysypowego

Tabela 1. Przykładowe wartości parametrów rozkładu parcia niesymetrycznego według EC-1-4

Kombinacja r_c/r	Mimośród kanału przepływu, e_c	Kąt środkowy $2\theta_c$ odcinka kontaktu kanału przepływu ze ścianą
$r_c = 0,25r$	$e_c = r(0,866 - 0,116\eta) = 0,78r$	$2\theta_c = 2\arccos(0,9907) = 15,4^\circ$
$r_c = 0,40r$	$e_c = r(0,755 - 0,175\eta) = 0,63r$	$2\theta_c = 2\arccos(0,9816) = 22,4^\circ$
$r_c = 0,60r$	$e_c = r(0,632 - 0,232\eta) = 0,45r$	$2\theta_c = 2\arccos(0,8870) = 55,4^\circ$

zacji komory w baterii: dla komór narożnych $k = 3$, dla komór wewnętrznych krawędziowych $k = 2$.

4. Parcie przy mimośrodowym opróżnianiu

Podana w Eurokodzie 1-4 metoda określenia parcia przy opróżnianiu mimośrodowym została opracowana przez Rottera dla wolnostojących silosów metalowych [3]. Założono, że obliczenie parcia tą metodą wykonuje się dla odpowiednio dużego mimośrodu otworu wysypowego e_e (rys. 3a) o wartości spełniającej warunek:

$$e_e \geq 0,25d_c \quad (6)$$

Przy mniejszych mimośrodkach otworu wysypowego (lub osiowym jego usytuowaniu) oblicza się jedynie parcie lokalne wg wzoru (3), zależnie m.in. od wartości mimośrodu. Podstawą wzorów metody Rottera jest definicja mimośrodu e_c kanału przepływu ośrodka w silosie, który określa się niezależnie od wartości mimośrodu otworu wysypowego (rys. 3).

Mimośród kanału przepływu e_c , według EC-1-4 [8] określa się z wyrażenia:

$$e_c = r \left[\eta \left(1 - \frac{r_c}{r} \right) + (1 - \eta) \sqrt{1 - \frac{r_c}{r}} \right] \quad (7)$$

W powyższym wzorze: $\eta = \mu / \tan \phi_p$, gdzie μ oznacza dolną wartość współczynnika tarcia o ścianę pionową, natomiast ϕ_p jest górną wartością kąta tarcia wewnętrznego ośrodka sypkiego.

Długość łukowego odcinka kontaktu niesymetrycznego kanału przepływu ze ścianą ograniczona jest kątem środkowym $2\theta_c$ (rys. 3a):

$$2\theta_c = \arccos \left(\frac{r^2 + e_c^2 + r_c^2}{2re_c} \right) \quad (8)$$

Gdy geometria kanału przepływu nie może być wprost określona przy założonym sposobie opróżniania i geometrii komory silosu, w celu uwzględnienia losowych i zmiennych w czasie rozmiarów kanału przepływu konieczne jest wykonanie obliczeń dla

minimum trzech podanych niżej kombinacji wartości promienia kanału r_c :

$$r_c = 0,25r, r_c = 0,4r, r_c = 0,60r.$$

Kombinacje te określono dla silosu na pszenicę, przyjmując wartość parametru $\eta = 0,738$.

Z przytoczonych wyżej przykładowych obliczeń wykonanych dla silosu na pszenicę wynika, że mimośród kanału przepływu niesymetrycznego w komorze oraz długość kontaktu kanału ze ścianą, a także wartości parcia w strefie kontaktu kanału ze ścianą nie zależą od wartości mimośrodu otworu wysypowego.

Nieuwzględnienie tej zależności w obliczeniach niesymetrycznego rozkładu parcia we wzorach Eurokodu 1-4 jest słabością przytoczonej metody obliczeń. Wpływ wartości mimośrodu otworu opróżniania był sygnalizowany w wielu badaniach doświadczalnych na modelach i na obiektach w skali naturalnej [1], [2], [3]. Należy przy tym dodać, że mimośród otworu wysypowego jest podstawą określenia niesymetrycznego rozkładu parcia według aktualnej normy australijskiej [9] (rys. 3b) i wycofanej już normy niemieckiej [10]. W normie australijskiej [9] obowiązuje wzór (oznaczenia dostosowano do zapisów Eurokodu 1-4):

$$p_{e,\max} = p_{he} \left(\frac{e_e}{2r} - 0,1 \right) \geq 0 \quad (9)$$

gdzie e_e – mimośród otworu wysypowego względem osi pionowej komory (rys. 3b).

5. Parcie termiczne na ścianę silosu

Parcie termiczne wywołane jest obniżeniem się średniej temperatury ściany silosu cylindrycznego, z uwagi na opór jaki stawia materiał sypki. W tym zakresie w treści Eurokodu 1-4 występuje sprzeczność wynikająca z zapisu, cyt. p. 4.1. (2) „Sztywność ośrodka sypkiego powinna być pomijana przy wyznaczaniu warunku stateczności ściany silosu, nie należy także jej przyjmować do modyfikacji obciążeń wyznaczonych według niniejszej normy. Wpływ eksploatacyjnych deformacji ściany na parcie ośrodka składowanego w silosie należy pomijać, chyba że zastosowana zostanie racjonalnie zweryfikowana metoda analizy”.

Sprzecznosc polega na tym, że w p. 5.6.2. Eurokodu 1–4 podano wzór na określenie parcia termicznego p_{hT} , który właśnie został wyprowadzony na podstawie definicji sztywności ośrodka sypkiego i termicznych deformacji wolnostojącego silosu cylindrycznego, które mogą wystąpić w czasie eksploatacji

$$p_{hT} = C_T \alpha_w \Delta T \frac{E_w}{\frac{r}{t} + (1 - \nu) \frac{E_w}{E_{sU}}} \quad (10)$$

gdzie: C_T – współczynnik obciążenia temperaturą, α_w – współczynnik rozszerzalności termicznej ściany silosu, ΔT – równomierny spadek temperatury ściany, r – promień cylindrycznej komory ($r = d_c/2$); t – grubość ściany, E_w – moduł sprężystości materiału ściany, ν – współczynnik Poissona ośrodka sypkiego, E_{sU} – efektywny moduł sprężystości ośrodka, E_{sU} – moduł sprężystości ośrodka sypkiego w silosie wyznaczany na podstawie badań doświadczalnych lub z załącznika C Eurokodu 1–4.

Wzór (10) opracowany wiele lat temu przez Theimera [4] dla komór silosów stalowych nie powinien być zalecany w podanej wyżej postaci do obliczeń komór żelbetowych, w których rozciągany przekrój zbrojonej ściany jest zarysowany pod wpływem sił rozciągających wywołanych parciem statycznym podczas składowania ośrodka. Nie można więc obliczać deformacji i naprężeń termicznych ściany przyjmując wyłącznie przekrój odpowiadający pełnej grubości t betonowego elementu. Należałoby także uwzględnić spadek modułu sprężystości betonu ściany w funkcji pęcznienia. Jakkolwiek w założeniach wzoru (10) przyjęto, że spadki temperatury ściany są krótkotrwałe, to termiczne deformacje ściany nakładają się na odkształcenia konstrukcji betonowej już obciążonej wielodniowym składowaniem materiału sypkiego. Wymagałoby to przyjęcia efektywnego współczynnika sprężystości betonu $E_{c,eff}$, według wzorów podanych w Eurokodzie 2 i zastępczego przekroju A_{ce} rozpatrywanego pasma ściany betonowej ze zbrojeniem obwodowym A_s :

$$A_{ce} = 1 \cdot t + A_s \frac{E_s}{E_{c,eff}} \quad (11)$$

Należy także zauważyć brak w EC1–4 zasad określania parcia termicznego w komorach baterii silosowych. Zagadnienie to było przedmiotem obszernej analizy numerycznych autora niniejszej pracy [7]. Analizy te wykazały, że parcie termiczne w wyniku ochłodzenia ściany w komorach zablokowanych jest znacząco większe, niż w identycznych co do rozmiarów komorach wolnostojących.

5. Podsumowanie

Europejska norma obciążeń w silosach i zbiornikach na cieczy PN-EN 1991–4:2008 uwzględnia liczne postulaty badaczy zajmujących się tą problematyką. Jednak mimo nowoczesnego ujęcia wielu specyficznych zagadnień związanych z wyznaczaniem obciążeń w silosach, w zakresie normy pominięto niektóre sytuacje projektowe, takie jak baterie komór zablokowanych lub silosy wyposażone w układy kilku otworów wysypowych. Brak jest też w Eurokodzie odniesienia do obciążeń dynamicznych, które mają miejsce w wielu silosach.

Niektóre z przyjętych rozwiązań są co najmniej dyskusyjne, jak np. sposób wyznaczania parcia niesymetrycznego dla dużych silosów cylindrycznych opróżnianych przez otwory usytuowane na mimośrodku równym co najmniej połowie promienia komory. Trudno bowiem zaakceptować założenie, że niesymetryczny rozkład parcia w takim przypadku nie zależy od wartości mimośrodu otworu wysypowego.

Nieprecyzyjnie określono też obciążenia w komorach żelbetowych wywołane obniżeniem się temperatury zewnętrznej ściany, co powoduje dodatkowe parcie termiczne. Dotyczą one pominięcia specyfiki żelbetu, poddanego wpływom pęcznienia i zarysowania, które wymagałyby modyfikacji wzoru opracowanego wiele lat temu dla komór stalowych.

Niektóre z wymienionych zastrzeżeń mogłyby zostać usunięte w brakującym dotychczas Załączniku Krajowym, bądź uwzględnione w trakcie prac nad udoskonaleniem Eurokodów konstrukcyjnych, w ramach uruchomienia w roku 2011 Mandatu 466 Unii Europejskiej.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Carson J. W., Holmes T., Silo Failures: why do they happen? Task Quartely 7 No 4, 2003, s. 499–512
- [2] Martens. P., Silo Handbuch. Wilhelm Ernst & Sohn Verlag. Berlin, 1988
- [3] Rotter, J. M.: Guide for the Economic Design of Circular Metal Silos, Edit. Spon, 2001.
- [4] Theimer D. F., Bersten von Stahlsilos bei tiefen Temperaturen. Der Bauingenieur No. 3. 1967, s. 102–105
- [5] Łapko A., Prusiel J., Structural analysis of RC circular grouped silos under patch actions. Granular Matter Journal, Publisher: Springer Verlag. Vol. 6, No 2 –3, 2004, s. 185–190
- [6] Łapko A., Wójcik R.: Analiza wpływu niecentrycznego opróżniania na naprężenia w cylindrycznym silosie na zboże. Acta Agrophysica. No. 4 (2), 2004, s. 393–405
- [7] Łapko A.: Efekty oddziaływania materiału sypkiego na żelbetowe ściany komór w eksploatowanych silosach na zboże. Wydawnictwa Politechniki Białostockiej. Z. Nr. 71. 1989. s. 224
- [8] PN-EN 1991–4:2008. Eurokod 1. Oddziaływania na konstrukcje. Część 4: Silosy i zbiorniki
- [9] AS 3774–1996, Loads on Bulk Solids Containers, Australian Standard, Standards Association of Australia, Sydney.
- [10] DIN 1055, Teil 6., Lasten in Silozellen, Deutsche Norm, 1987