

Zbiorniki z betonu sprężonego do przechowywania LNG

Część II

Tadeusz J. Marchaj

5. PROJEKT ZBIORNIKA Z BETONU SPRĘŻONEGO.

5.1. WSTĘP.

Ogólnie, są dwie metody, w których beton może być sprężony przez elementy stalowe. Jest to: „pretensioning” oraz „post-tensioning”. Zasadniczą różnicą pomiędzy tymi dwoma metodami, są warunki w jakich znajduje się beton w momencie, gdy stalowe elementy są naprężane.

Metoda „pretensioning” polega na tym, że stal jest naprężana zanim beton jest umieszczony w formie, zaś metoda „post-tensioning” polega na tym, że stal jest naprężana; gdy beton osiągnął odpowiednią wytrzymałość na ściskanie.

Ta bardzo prosta zasada związana z betonem sprężonym w zbiornikach, polega na stworzeniu początkowych naprężeń obwodowych ściskających w ścianach zbiornika o takiej wielkości, że w każdym czasie w przyszłości, gdy zbiornik jest napełniony cieczą, wypadkowe naprężenie w ścianie, będzie zawsze naprężeniem – ściskającym, a (nigdy nie rozciąganiem!!!). Idea sprężania zbiornika, używając zależności: naprężenie versus odkształcenie, w ścianie: najpierw sprężonej, a potem poddanej działaniu ciśnienia płynu, jest przedstawiona na RYS. 15.

Aby w pełni docenić ideę sprężania, zachowanie się zbiornika z betonu zbrojonego i obciążonym ciśnieniem wewnętrznym jak przedstawiono na RYS. 16, jest prawie fizycznie niemożliwe, zbudować zbiornik zbrojony, wolny od rozwoju pęknięć, szczególnie, gdy uwzględnimy nieunikniony rozwój naprężeń termicznych.

Jest to jedna z przyczyn, dlaczego użycie betonu zbrojonego nie może być potraktowane na serio, jako właściwe rozwiązanie dla zbiorników na LNG.

5.2. Projektowanie ściany zbiornika z betonu sprężonego.

Zewnętrznie zastosowana siła sprężająca w ścianie jest obliczana według następującego równania

$$P_{początkowa} = K(\gamma \cdot H \cdot R \cdot f \cdot t \cdot 100) \text{ for bottom of the wall}$$

Gdzie:

γ – gęstość płynu

H – maksymalny poziom płynu w zbiorniku

R – promień zbiornika

f – naprężenie ściskające w ścianie (residual ze spec.)

K – współczynnik strat

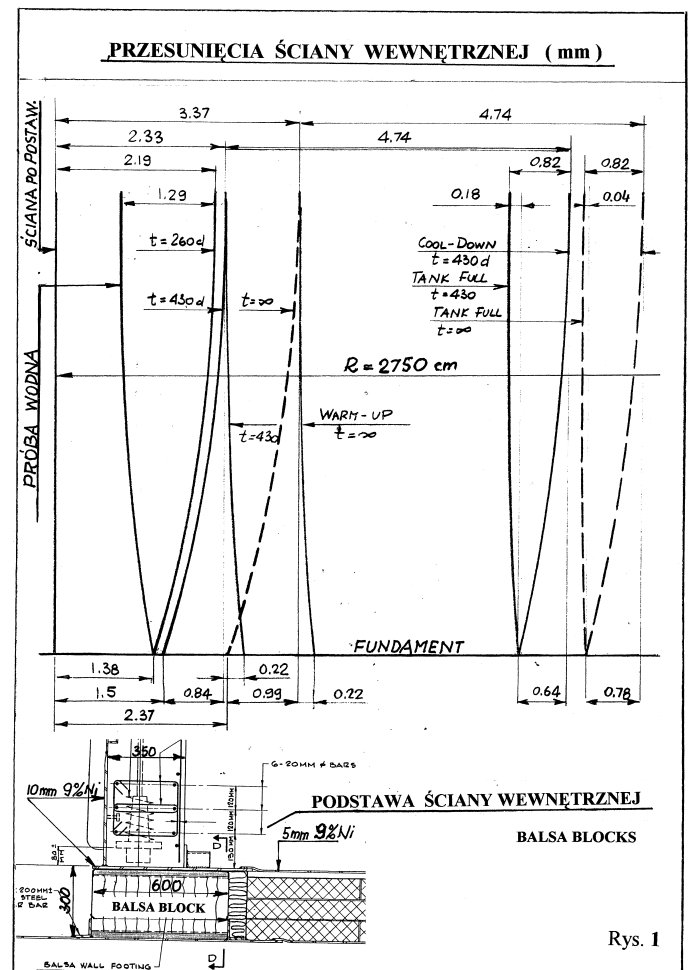
Współczynnik strat „K” może być obliczony używając tablic i równań z kodów lokalnych lub międzynarodowych autorytetów w betonie sprężonym.

Współczynnik strat K zawiera straty naprężeń na skutek:

a) Elastycznej deformacji ściany w czasie sprężania:

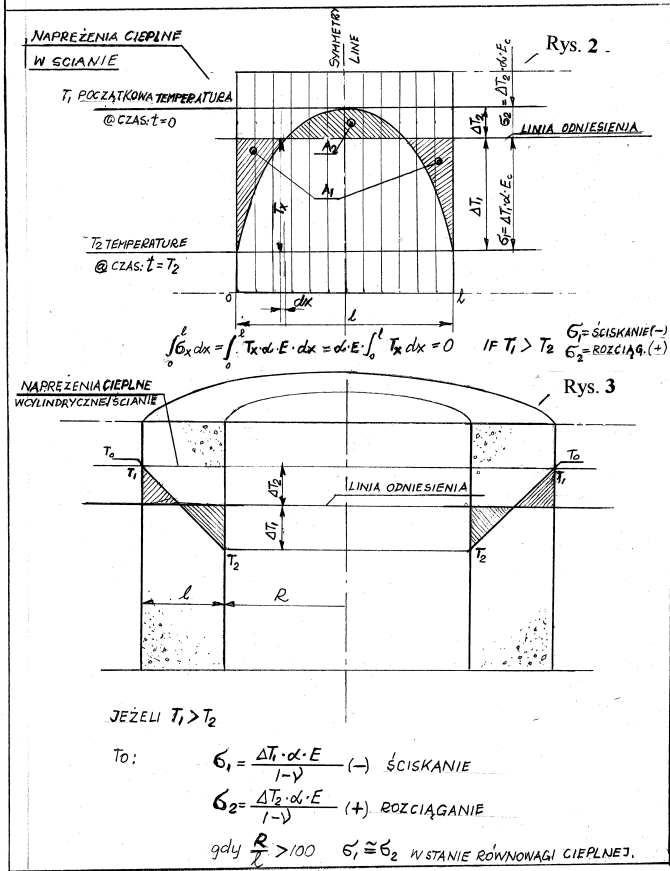
$$\delta_{SL} = \frac{1}{2} \cdot \frac{\delta_c}{E_c} \cdot E_s$$

b) Pełnienia betonu pod działaniem sił ze sprężających z elementów lub innych stałych obciążeń. Definicją pełnienia jest plastyczna deformacja betonu pod



Rys 1.

PODSTAWOWE RÓWNANIA NAPRĘŻEŃ TERMICZNYCH



Rys.2.

działaniem stałego obciążenia. Wielkość pełnienia zależy od wielkości obciążenia i czasu trwania obciążenia oraz stopnia dojrzałości betonu. Oczywiście zależy ono od mieszanki betonu i geometrii struktury oraz jego dojrzewania

$$\delta_c = \epsilon_c \cdot E_s = \frac{\delta_c}{E_c} \cdot E_s \cdot c$$

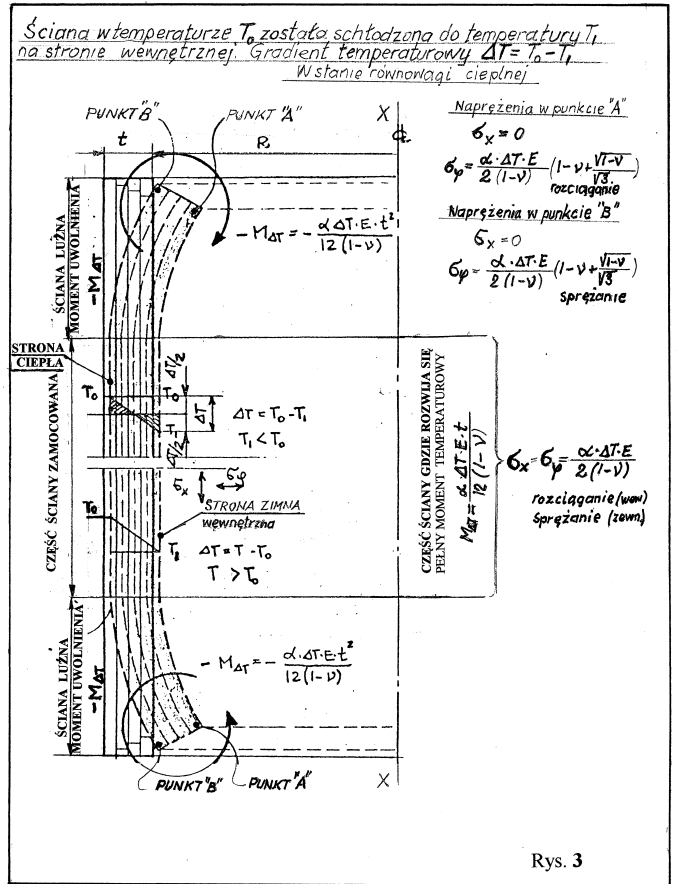
gdzie δ_c = factor pełnienia = Kc. Kd. Kb. Ke. Kt

- c) Kurczenie się betonu. Kurczenie się betonu jest zdefiniowane jako plastyczna deformacja betonu w czasie procesu jego schnięcia. Jest głównie funkcją straty wody z betonu i konsekwentnie funkcją wilgotności w otaczającej atmosferze, geometrii struktury oraz kompozycji betonu i czasu.

$$\delta_c = \epsilon_s \cdot E_s = \epsilon_c \cdot K_b \cdot K_e \cdot K_t \cdot E_s$$

- d) Relaksacja sprężającej stali: Relaksacja jest zdefiniowana jako pełnienie stali o dużej wytrzymałości utrzymywanej w dużym naprężeniu przez długi okres czasu. Straty te mogą być wysokie do 16%, gdy utrzy-

DEFORMACJA CYLINDRYCZNEJ ŚCIANY pod wpływem gradientu temperaturowego



Rys.3.

mywane naprężenie będzie około 80% naprężenia doraźnego.

$$\Delta \delta_{ap} = \Delta \delta_{ap} \cdot \left(1 - \frac{3(\delta_c + \delta_s)}{\delta \sin - \delta_{SL}}\right)$$

Gdzie: $\delta \sin$ = początkowe naprężenie w drutach sprężających

Relaksacja podana przez producenta stali w czasie $t = \infty = \delta_{\sin a}$

Totalne straty w sprężeniu wyrażone w naprężeniu: $S_L + c + s + ap$

Straty wyrażone w procentach = $\frac{\sum \delta}{\delta \sin} \cdot 100\%$

Współczynnik strat $K = \frac{100}{100 - \frac{\sum \delta}{\delta \sin} \cdot 100} = \frac{1}{1 - \frac{\sum \delta}{\delta \sin}}$

Zazwyczaj dla kriogenicznych zbiorników współczynnik K, jest około 1,5 obliczany dla ściany przy podstawie. Straty dla sprężania w kierunku pionowym obliczane

są w podobny sposób. Wielkość początkowych naprężeń w ścianie w kierunku pionowym jest określana przez przewidywane naprężenia termiczne podczas schładzania zbiornika lub naprężenia wynikłe z momentów gnących, wynikłych z warunków istnienia sił tnących przy podstawie, lub kopule, szczególnie gdy mamy do czynienia z betonową kopułą. Naprężenia w pionowym kierunku są znacznie mniejsze. Konsekwentnie współczynnik strat K jest maksimum 1,3. Gdy współczynnik strat jest określony i początkowe sprężenie jest obliczone, przy znanym naprężeniu dopuszczalnym zostanie sprawdzona grubość.

$$P_{in} = K \cdot H \cdot R \cdot f_r \cdot t \cdot 100 = t \cdot 100 \cdot 0,55 \cdot f_c'$$

Zgodnie z normami in U.S. początkowe naprężenia w betonie, zaraz sprężaniu mogą być maksymalnie 0.55 f_c' . Stąd grubość ściany określa się jako:

$$t = \frac{K \cdot R \cdot H}{100(0,55 \cdot f_c' - K \cdot f_r)}$$

Przykład obliczeń typowej ściany 80 000 m³ zbiornika o wymiarach:

Srednica D = 55 m

Poziom płynu H. L. = 34 m przy gęstości = 540 kg/m³.

Oblicz grubość ściany, siłę sprężania przy podstawie, używając beton o wytrzymałości $f_c' = 320 \text{ kg/cm}^2$ i pozostałym naprężeniu 10 kg/cm^2

$$t = \frac{1,5 \cdot 540 \cdot 27,5 \cdot 34}{100(0,55 \cdot 320 - 1,5 \cdot 10)} = 47 \text{ cm}$$

co zawiera zbrojenie oraz liner.

Tak więc: **Ściana betonowa + n (tcs + Ar) = 40 + 7 (0, 7 + 0, 3) = 47 cm**

Dlatego ściana betonowa jest 40 cm gruba

Przekrój stali sprężającej przy podstawie ściany będzie: A st

$$P_{in} = 1,5 (540 \cdot 27,5 \cdot 34 + 10 \cdot 100 \cdot 47) = 827 \text{ t/m}$$

$$A_{st} = \frac{P_{in}}{S_{in}} = \frac{827000}{11000} = 75 \text{ cm}^2 / 1 \text{ m}$$

Co możemy „odkryć” w powyższych obliczeniach: stal sprężająca odpowiada w przekroju ściany stalowej o grubości, 0, 75 cm. Dla porównania spróbujmy znaleźć grubość ściany w zbiorniku o tych samych wymiarach zbudowanego ze stali 9% Ni.

$$t = \frac{\gamma \cdot H \cdot R}{f_s \cdot 100} = \frac{540 \cdot 35 \cdot 27,5}{1600 \cdot 100} = 3,2 \text{ cm}$$

Jak widzimy, istnieje dramatyczna różnica pomiędzy grubością ściany z betonu sprężonego a ścianą ze stali 9% Ni. Ta ogromna różnica w grubościach ścian całkowicie zmieniają filozofię projektowania, gdyż tak różne zbiorniki zachowywać się będą całkowicie różnie w każdym

możliwych warunkach jakie się mogą zdarzyć w okresie ich służby.

Konsekwencja tak wielkiej różnicy pomiędzy omawianymi ścianami, jest bardzo korzystna w każdym możliwym rozważaniu: strukturalnym, termicznym czy innych problemów dotyczących bezpieczeństwa

Przypadki, gdy gruba ściana z betonu sprężonego zachowuje się zgodnie z wymaganiami specyficznych sytuacji, są:

1. Rozłanie się LNG ze zbiornika: wewnętrznego i zewnętrznego
2. Efekt pożaru w sąsiedztwie
3. Eksplozje, tworzące fale ciśnienia lub szrapnele o dużej szybkości
4. Tornada lub przez tornada tworzone pociski
5. Trzęsienia ziemi
6. Gięcie i zmęczenie materiałów w połączeniu ścianą
7. Wyboczenia ściany wewnętrznej na skutek rozwoju ciśnienia w izolacji perlitowej (cykliczne sprężanie perlitu przez ścianę wewnętrzną wykonującą ruchy radialne zgodnie z cyklicznymi zmianami ciśnienia w zbiorniku.

6. ZACHOWANIE SIĘ ŚCIANY ZBIORNIKA Z BETONU SPRĘŻONEGO W NORMALNYCH WARUNKACH.

Przyczyny składające się na bardzo poważne zmiany wymiarów konstrukcji z betonu sprężonego są wynikiem samego sprężenia (deformacja elastyczna) jak i zjawisk zachodzących w samym betonie takich jak kurczenie się betonu (związane z jego schnięciem), które z kolei zależą od składu mieszanki betonu etc. Na wielkość zmian wymiarowych mają także wpływ: relaksacja strun sprężających beton oraz uzbrojenie betonu prętami stalowymi. No i oczywiście obciążenie ściany oraz warunki brzegowe samej konstrukcji. Patrz Rys. 1, 2 i 3.

Analiza tych zjawisk jest przedmiotem rekomendacji dla projektów i konstrukcji betonowych wydana przez FIP (Federation Internationale de la Precontrainte) oraz NFPA 59 (National Fire Protection Code).

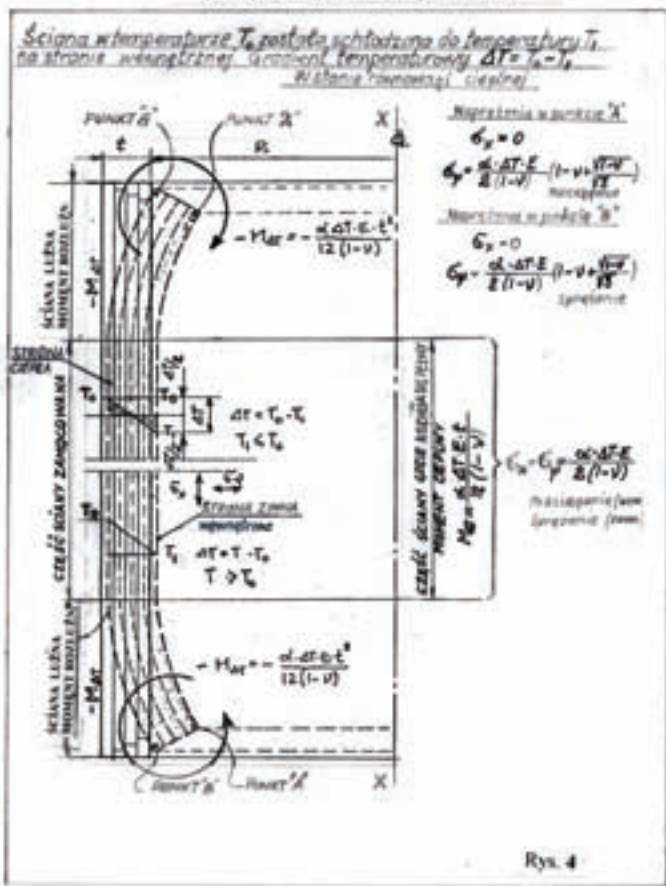
Projekt zbiornika na cieczy kriogeniczne wypracowany przez PRELOAD w okresie około 30 lat – to dwuścienny zbiornik z betonu sprężonego oparty na współzależnie pracujących elementach obu ścian wewnętrznej i zewnętrznej. Obydwie ściany zaprojektowane są według tych samych zasad:

1. Podstawa ściany MOŻE PRZESUWAĆ SIĘ PROMIENIOWO.
2. Płyta ze stali (grubości 5 mm) pokrywa ZEWNĘTRZNĄ STRONĘ ŚCIAN.
3. Obwodowe sprężenie ścian jest wykonane metodą KARUZELOWĄ

Powyższe elementy projektu umożliwiają:

1. Eliminację lub poważne zmniejszenie stałych naprężeń w konstrukcji.

DEFORMACJA CYLINDRYCZNEJ ŚCIANY pod wpływem gradientu temperaturowego



Rys. 4.

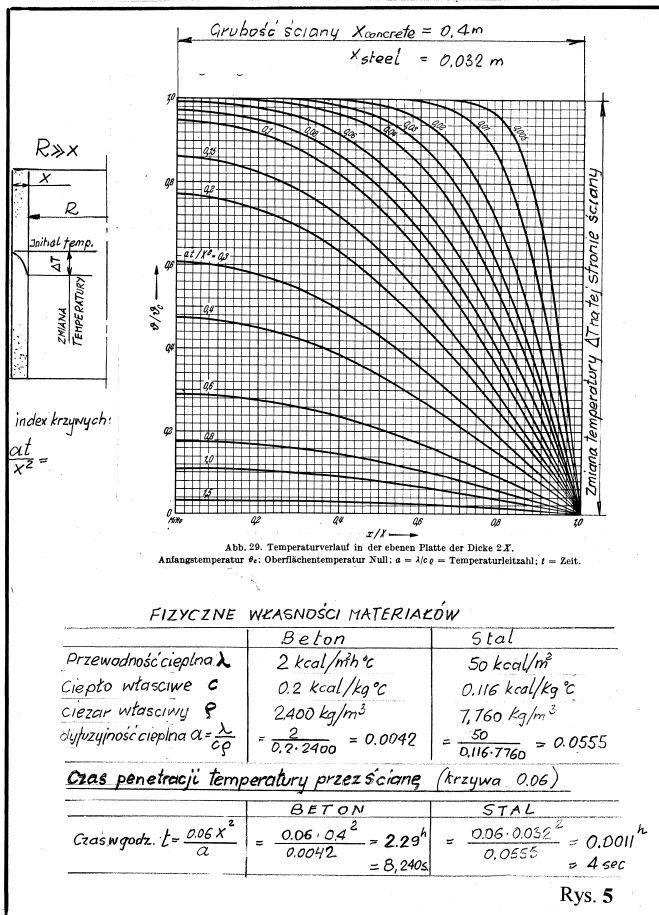
- Łatwość budowy zbiorników.
- Okresową kontrolę obwodowego systemu sprężania ściany zewnętrznej. Ona jedna może być obiektem możliwej korozji
- Zapewnienie gazoszczelnego projektu

Poniższy rozdział dotyczy najbardziej ważnego elementu projektu każdego **zbiornika z betonu sprężonego dla płynów kriogenicznych, a mianowicie wpływu na projekt** bardzo dużych przewidywanych zmian temperaturowych. **Tych co muszą się stać podczas pierwszego schładzania**, jak również tych, **co mogą się stać w warunkach nie kontrolowanych, na przykład:** wypełnienie zbiornika, radiacja cieplna (pożar w pobliżu) etc.

6.1 NAPRĘŻENIA CIEPLNE W ŚCIANIE NA SKUTEK ZMIAN TEMPERATURY.

Każda zmiana temperatury na zewnętrznej powierzchni ściany w wypadku płynów kriogenicznych dokonuje się (praktycznie) natychmiastowo w momencie „zwilżenia” płynem powierzchni ściany i prowadzi do powstania gradientu temperatury w poprzek ściany w czasie. Gradient temperatury, o którym się mówi to: $\Delta = 200^\circ\text{C}$.

ROZWÓJ TEMPERATURY W ŚCIANIE BETONOWEJ



Rys. 5.

Ten gradient temperatury wewnątrz ściany jest funkcją czasu i zależy on od: ciężaru właściwego, ciepła właściwego oraz współczynnika przewodności cieplnej.

W monolicie prostej ściany jej części nie mogą się deformować niezależnie od siebie. W stanie równowagi sąłkowanie wszystkich naprężeń w jej przekroju jest zero (0). Reakcja na podporach jest również zero (0).

RYS. 2. przedstawia rozkład temperatury w płycie w funkcji czasu po spadku temperatury na jej obu zewnętrznych powierzchniach. Naprężenia wewnętrzne są w stanie równowagi. W podanym rozkładzie temperatury, stan naprężeń w wybranym miejscu może być obliczony rozpatrując sieczne na krzywej rozkładu temperatury, powyżej i poniżej linii odniesienia, gdzie $\Delta T_2 = T_1 - T_2$ jest wielkością maksymalną temperatury, gdy pojawi się maksymalne naprężenie ściskające. Pamiętając, że suma wypadkowa naprężeń w całym przekroju równa się zero, rozkład naprężeń można znaleźć przecinając linię temperatury linią prostą w taki sposób, że utworzone powierzchnie nad i pod linią prostą będą równej wielkości.

Naprężenia można otrzymać z równania:
 $\delta = E \cdot \alpha \cdot \Delta T$

gdzie: E – współczynnik elastyczności materiału
 α – współczynnik rozszerzalności cieplnej
 ΔT – zmiany temperatury nad i pod linią odniesienia.

W podobny sposób możemy znaleźć naprężenia cieplne w ścianach cylindrycznych. Wartość $(1-\nu)$ w mianowniku jest efektem cylindrycznego kształtu ściany co powoduje efekt „zamocowania” z kierunku poprzecznym do osi cylindra (efekt Poissona).

Na RYS. 3. jest zaprezentowane zachowanie się cylindrycznej ściany i rozwój w niej naprężeń. Możemy dostrzec, że na skutek stałych warunków temperaturowych (steady state) linie temperatur są liniami prostymi i że naprężenia w połowie ściany są:

$$\frac{\Delta T \cdot \alpha \cdot E}{2(1-\nu)}$$

Gdzie: ΔT – totalna różnica w temperaturze w poprzek ściany. Linia odniesienia dzieli ΔT po połowie.

Na Rys. 5. zaobserwować możemy dlaczego brak zamocowania u obu końców ściany powoduje zmianę kształtu cylindra ściany a tym samym naprężeń. Aby znaleźć pełne wytłumaczenie podanych wzorów musimy użyć teorii skorup, lecz w tej chwili nie będzie to tematem tej pracy.

Dla lepszego zrozumienia problemów związanych ze zmianami temperatur, w elementach strukturalnych, jest bardzo wskazane zapoznać się z użyciem znanej graficznej metody określania temperatur, przedstawionej na RYS. 5.

Szereg krzywych reprezentuje rozkład temperatur w ścianie po upływie różnego czasu od zmiany temperatury jednej strony ściany o wielkość T . Liczby na krzywych są rezultatem obliczenia wyrażenia:

Wyrażenie $\frac{at}{x^2}$ jest nazywane indeksem krzywej

Gdzie: $a = \frac{\lambda}{c\rho}$ – cieplna dyfuzyjność

c = ciepło właściwe betonu = kcal/kg. C

X – thickness of the wall w metrach

λ – przewodność cieplna (kcal m/m² h C)

t time (hours)

Obliczenie czasu potrzebnego dla penetracji temperatury przez typowy beton oraz stal jest przedstawiony dla porównania na RYS 5. Dla betonu o grubości 0,40 m i płyty stalowej o grubości 3,2 cm (0.032 m) będących obiektem nagłej zmiany temperatury z jednej strony (wylanie się LNG na ścianę). Dostrzegamy, że przenikanie temperatury przez beton: (indeks 0,06) pojawi się po 2,29 h, dla stali to samo się stanie po 0,0011 h, co równa się około 4 sekund. Przenikanie temperatury przez beton jest bardzo powolnym procesem, w przeciwieństwie do ściany stalowej, którą to zmianę można nazwać „szokiem cieplnym”. Trudno jest się wyrazić tak samo o betonie.

6.2. NIEKONTROLOWANE SCHŁADZANIE ŚCIANY.

Ściana jest przedmiotem nagłej zmiany temperatury po jednej stronie. Jest ona w kontakcie z LNG. Na RYS: 4a, 4b i 4c. przedstawiony jest rozwój naprężeń cieplnych w ścianie. Możemy wyciągnąć od razu wnioski, że naprężenia rozciągające c będą na pewno większe od P_{in} i oczywiście ściana w kontakcie z LNG pokryje się drobną siatką pęknięć, ale ich głębokość będzie ograniczona przez temperaturę na skutek wolnego procesu dyfuzji ciepła. Spękana część betonu staje się izolacją przez którą nie przenika płyn. W bardzo wąskich szczelinach gaz i płyn nie mogą się poruszać w przeciwnych kierunkach. Poza tym strona zewnętrzna ściany jest pokryta 5-cio mm gazoszczelną płytą stalową i pokrytą warstwą torkretu.

Na RYS 4.b. jest przedstawiony prawie pełny rozwój pęknięć w ścianie. Głębokość pęknięć zatrzyma się obliczalnym dystansie 18 cm od zwilżonej powierzchni.

RYS 4.c. jest w temperaturowym stanie: („steady state”).

Obliczenia wykonane zastały dla 80,000 m³ zbiornika na LNG dla ENAGAZ w Barcelonie.



Tadeusz Marchaj (1924) uzyskał stopnie: inżyniera mechanika ze specjalnością silników lotniczych w roku 1949 oraz magistra inżyniera ze specjalnością energetyki przemysłowej w roku 1966, oba na Politechnice Warszawskiej.

Jako inżynier kriogeniczny pracował blisko 11 lat w Instytucie Fizyki PAN w Warszawie, gdzie projektował i konstruował urządzenia kriogeniczne używane w badaniach związanych z fizyką ciała stałego.

Po przybyciu do USA w roku 1969 podjął pracę w Preload Technology w Nowym Jorku, gdzie rozpoczął projektowanie i konstruowanie zbiorników na LNG i LPG w: USA, Kanadzie, Anglii oraz Hiszpanii. Opublikował 10 prac dotyczących: projektowania zbiorników z betonu sprężonego oraz użycia specjalnych systemów przechowywania LNG, szczególnie w warunkach istniejącego zagrożenia trzęsieniem ziemi. Posiada 11 patentów w dziedzinie przechowywania LNG.