

## RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Bartłomieja RATAJEWICZA  
p.t.: **Wpływ eksploatacji na charakterystyki dynamiczne  
jednoprzewodowych żelbetowych kominów przemysłowych**

### 1. Podstawa recenzji

Recenzja została przygotowana na zlecenie Wydziału Inżynierii Lądowej Politechniki Krakowskiej w Krakowie pismem LO.510.8.1.2022 z dnia 4 maja 2022r. podpisanym przez Dziekana Wydziału Inżynierii Lądowej pana prof. dr hab. inż. Andrzeja Szarotę, zgodnie z uchwałą Rady Naukowej Wydziału Inżynierii Lądowej Politechniki Krakowskiej z dnia 27 kwietnia 2022r.

### 2. Przedmiot recenzji

Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska autorstwa mgr inż. Bartłomieja Ratajewicza pt.: „*Wpływ eksploatacji na charakterystyki dynamiczne jednoprzewodowych żelbetowych kominów przemysłowych*”, której promotorem jest prof. dr hab. inż. Tadeusz Tatara oraz promotorem pomocniczym dr inż. Stanisław Kańka.

Rozprawa została zawarta w jednym tomie formatu A4 i przedstawiona w dziewięciu głównych rozdziałach w ramach których znajduje się podsumowanie i wnioski. Ostatnią część stanowi bibliografia z wykazem cytowanych publikacji. Publikacje zawierają zestaw 62 pozycji naukowych i naukowo-technicznych w tym 25 w języku angielskim, 3 powołania na strony internetowe oraz 7 pozycji niepublikowanych. Całość pracy jest przedstawiona na 116 stronach.

#### 2.1. Motywacja Doktoranta

Motywację Doktoranta stanowiło udowodnienie tezy, że *modele dynamiczne żelbetowych kominów jednoprzewodowych, które uwzględniają zmiany materiałowe oraz imperfekcje geometryczne mogą dobrze opisywać ich charakterystyki dynamiczne i mogą zostać wykorzystane do wyznaczenia odpowiedzi na wymuszenia kinematyczne*. Problem, na który



zwraca uwagę Doktorant, jest bardzo aktualny ze względu na znaczną liczbę istniejących konstrukcji (autor podaje liczbę 350 szt. o wysokości ponad 80m), których wiek przekracza okres na jaki były projektowane. Odpowiedź na pytanie, czy bezpieczeństwo konstrukcji jest zachowane oraz istnieje możliwość ich dalszej eksploatacji jest kwestią bardzo istotną z punktu widzenia utrzymania i planowania ekonomicznego zakładów przemysłowych. Połączenie metody doświadczalnego określania charakterystyk dynamicznych konstrukcji oraz parametrów materiałowych, które zostaną wykorzystane podczas obliczeń numerycznych daje możliwość całościowej oceny konstrukcji. Na tej podstawie można prognozować dalsze zachowanie się konstrukcji przy różnych scenariuszach obciążeń/wymuszeń jakim poddana będzie konstrukcja. Może to być bardzo pomocne właśnie przy podejmowaniu decyzji, co do dalszego użytkowania tych obiektów. Z tego powodu problem rozważany przez Doktoranta jest jak najbardziej ważki i aktualny.

## **2.2. Struktura rozprawy doktorskiej**

Struktura pracy została podzielona na dziewięć podstawowych rozdziałów, oraz osobny rozdział bibliografii ze spisem powołanych publikacji i stron internetowych.

**Pierwszy rozdział** pracy stanowi motywację Doktoranta i jego rozważania w obszarze wiedzy dotyczącego problemu zawartego w temacie. Obejmuje on genezę pracy, przegląd aktualnego stanu wiedzy na ten temat oraz cel, zakres i tezę pracy.

Kolejny rozdział (**rozdział 2**) obejmuje rozważania nt. aspektów zużycia kominów żelbetowych. W ramach tej części Doktorant rozpatrywał sprawy zagrożenia korozyjnego, a także zmiany fizyczne i chemiczne ujawniające się podczas eksploatacji obiektów.

**Rozdział trzeci** opisuje istotne zagadnienie dokonywania pomiarów konstrukcji w zakresie materiałowym oraz parametrów dynamicznych. Przedstawione są również podstawy teoretyczne statystycznej analizy porównania wektorów modalnych analizowanych obiektów. W ramach tego rozdziału zaprezentowano również konstrukcje (kominy o wysokości 120, 180 i 260m), które będą przedmiotem analizy w następnej części pracy.

W **rozdziale czwartym** zostały przedstawione metody modelowania numerycznego konstrukcji kominów i analiza tych modeli. Przedstawiono tutaj utworzenie geometrycznego modelu numerycznego wraz ze zdefiniowaniem modelu materiałowego. W dalszej części tego rozdziału określono trzy typy modeli numerycznych – powłokowy (A), bryłowy dla płaszcza komina (B) oraz bryłowy dla płaszcza i wymurówki komina (C).

Badania in-situ analizowanych konstrukcji kominów zostały przedstawione w **rozdziale piątym**. Pomiary przeprowadzano dla komina o wysokości 120m z wykorzystaniem tensometrów elektrooporowych, akcelerometrów PCB i wibrometru laserowego. Pomiary



komina o wysokości 260m zostały przeprowadzone z wykorzystaniem tensometrów elektrooporowych i akcelerometrów piezoelektrycznych. Uzyskane w ten sposób częstotliwości rezonansowe dla zastosowanych typów czujników były różne w zakresie do około 10% w obu konstrukcjach. Nie przedstawiono pomiarów dla komina o wysokości 180m, z czego można wnioskować, że takowych nie wykonano.

W **rozdziale szóstym** została przedstawiona analiza porównawcza badań dynamicznych konstrukcji oraz modeli numerycznych konstrukcji. W zależności od zastosowanych urządzeń pomiarowych oraz typów modeli numerycznych błędy w określeniu częstości drgań własnych dochodziły do 16% dla komina o wysokości 120m, modelu bryłowego płaszcza i wymurówki (C) oraz pomiarów akcelerometrem i tensometrami. Dla komina o wysokości 260m największa różnica w częstościach drgań własnych wynosiła 12% dla modelu powłokowego (A) i pomiarach wykonanych akcelerometrem. Przeprowadzono również analizę CrossMAC dla obu kominów, dla pierwszych dwu okresów drgań konstrukcji. Stwierdzono tutaj również, że typem konstrukcji, która najlepiej oddaje rzeczywisty stan obiektu, pod względem okresu drgań własnych konstrukcji, jest model B – bryłowy w zakresie płaszcza.

Kolejny **rozdział siódmy** przedstawia wyniki analiz numerycznych w zakresie naprężeń i przemieszczeń osi trzonu dla obu konstrukcji (120m i 260m) pod wpływem wymuszenia dynamicznego o charakterze sejsmicznym i parasejsmicznym. Do obliczeń przyjęto przykładowe wstrząsy tektoniczny z San Francisco (1971, magnituda 6,5) oraz parasejsmiczny z LGOM (2006, magnituda 4,8). Analizę przeprowadzono metodą Time History Analysis (THA) dla modelu typu B. W każdym przypadku wystąpiło znaczne przekroczenie naprężeń w stosunku do wytrzymałości zarówno dla stali zbrojeniowej jak i betonu. Wystąpiło również przekroczenie dopuszczalnego przemieszczenia głowicy komina do 100%.

**Rozdziały 8 i 9** to kolejno podsumowanie i wnioski.

Ostatnim **rozdziałem (jedenastym)** jest bibliografia ze spisem literatury.

### **3. Ocena rozprawy**

#### **3.1. Ocena merytoryczna**

##### **3.1.1. Aktualność tematu**

Analizy numeryczne złożonych problemów konstrukcyjnych stają się podstawowym źródłem naukowych obserwacji oraz zastosowań inżynierskich. Znaczna liczba kominów przemysłowych, które powstały w poprzednim wieku, jest w dalszym ciągu nieprzerwanie eksploatowana. Pogarszający się ich stan techniczny w wyniku naturalnego zużycia może przyczynić się powstania sytuacji awaryjnych. Dodatkowo specyficzne obciążenia dynamiczne



konstrukcji w wyniku działania porywów wiatru, czy zjawisk parasejsmicznych w pewnych rejonach kraju, komplikują analizę stanu technicznego takich konstrukcji. Z tego powodu podjęty przez doktoranta temat analizy wpływu eksploatacji jednoprzewodowych kominów żelbetowych na ich charakterystyki dynamiczne jest ze wszech miar zasadny i godny uwagi. Połączenie z jednej strony badań in-situ konstrukcji i uwzględnienie otrzymanych rezultatów w tworzeniu modelu numerycznego daje mocne podstawy do tego, że otrzymane wyniki analiz obliczeniowych są bardzo wiarygodne. Potwierdza to zasadność prowadzenia analiz numerycznych do analizy zachowania konstrukcji i prognozowania ich dalszej pracy. Z tego punktu widzenia ten sposób podejścia jest godny polecenia i wykorzystania w szeroko rozumianej praktyce eksperckiej.

### 3.1.2. Ocena podejścia do problemu

Główną część pracy Doktoranta można podzielić na kilka wynikających z siebie części, które kończą się analizą numeryczną konstrukcji poddanej wymuszeniu kinematycznemu. Przeprowadzenie przez Doktoranta badań materiałowych, w wyniku których zostały określone parametry materiałowe betonu konstrukcji, a także opisany wpływ oddziaływań chemicznych na beton jest bardzo istotny z punktu widzenia późniejszego określenia modelu materiałowego w analizie numerycznej. Równie istotnym etapem pracy było określenie okresu drgań własnych konstrukcji kilkoma metodami badawczymi. Określenie okresu drgań własnych konstrukcji dla różnych modeli numerycznych i wykalibrowanie najlepszego odwzorowania rzeczywistości wykorzystując analizę CrossMAC, to kolejny etap obliczeń. Rezultaty tych wstępnych etapów pracy dały podstawę do stworzenia ostatecznych modeli dwu kominów o wysokościach 120 i 260m, które zostały obciążone dużym wymuszeniem sejsmicznym i parasejsmicznym. Takie etapowe podejście jest szczególnie istotne dla analiz konstrukcji poddanych oddziaływaniom dynamicznym. Należy spodziewać się, że otrzymane wyniki analiz będą oddawać rzeczywistość z dużą dokładnością, co jest dużą wartością pracy.

Pewnym mankamentem pracy jest dość skąpy sposób prezentacji analiz numerycznych zarówno w zakresie modelowania konstrukcji, a szczególnie wyników obliczeń. Zastosowany program MIDAS FEA daje bardzo duże możliwości w tym zakresie, a szczególnie w sposobie prezentacji map naprężeń, czy analizy deformacji konstrukcji. Przedstawienie wyników analizy w postaci tabelarycznej, bez umiejscowienia elementów dla których przedstawiono wyniki jest mało precyzyjne.

## 4. Uwagi ogólne i szczegółowe

### 4.1. Uwagi ogólne

W czasie czytania pracy autorowi recenzji nasunęły się pewne uwagi natury ogólnej, które powinny być polem do polemiki z Doktorantem w poruszanych kwestiach.

- Praca zawiera różny zestaw badań materiałowych i pomiarów konstrukcji oraz na koniec analiz numerycznych, a są to:
  - Badania materiałowe trzonu kominów – dla dwu obiektów o wysokości 120 i 180m;
  - Informacje na temat deformacji trzonu konstrukcyjnego – dla komina o wysokości 120m;
  - Informacje nt. przemieszczenia wierzchołka komina – dla konstrukcji o wysokości 180m;
  - Pomiary drgań in-situ – dla konstrukcji 120 i 260m;
  - Obraz przemieszczeń trzonu dla pierwszej, drugiej i trzeciej postaci drgań własnych – dla komina o wysokości 180m;
  - Analizy numeryczne drgań sejsmicznych i parasejsmicznych wykonane dla konstrukcji o wysokości 120 i 260m.

Przedstawione informacje dają obraz dość chaotycznego określenia parametrów konstrukcji oraz przyjęcia do analiz obiektu (komin o wysokości 260m), o którym wiedza jest najmniejsza. Proszę o krótki komentarz na następujące zagadnienia:

- Co legło u podstaw takiego, a nie innego podejścia do badań i analiz numerycznych?
- Co było powodem pominięcia badań in-situ komina  $h=180m$ ?
- Czy zasadne jest odnoszenie się do tej konstrukcji ( $h=180m$ ), jeżeli nie ma sposobów określenia rzeczywistego okresu drgań własnych konstrukcji?
- W podrozdziale 4.1.3 (str. 43) przedstawiono bardzo skrótowo metodykę modelowania uszkodzeń i imperfekcji. Imperfekcje geometryczne rzeczywistej konstrukcji są stosunkowo prosto „implementowalne” w modelu numerycznym, ale przy dość dużym nakładzie pracy. Destrukcyjny wpływ gazów spalinowych na konstrukcję płaszcza komina o wysokości 180m został również dość dokładnie przedstawiony na stronie 42 w tablicy 4. W modelu wpływ ten został uwzględniony przez zmniejszenie grubości płaszcza. Natomiast sposób uwzględnienia zarysowań został podany dość enigmatycznie. Główne zarysowania konstrukcji zazwyczaj występują w postaci pionowych rys, często wskrośnych. Rysy takie występują w



pewnych odległościach od siebie, co powoduje, że nie muszą obejmować każdego elementu skończonego zamodelowanej konstrukcji. O tym, że takie rysy występują w obiekcie wzmiankuje się w inwentaryzacji, co przytoczone jest na str. 48 pracy. Niestety nie ma żadnych informacji na ten temat, ani wniosków wypływających z tej inwentaryzacji. Proszę o komentarz w jaki sposób uwzględniono efekty obniżenia sztywności konstrukcji wywołane rysami i zaprezentowane w rozdziale 4.2 opisującym model materiałowy rys rozmytych zaimplementowany z programu MIDAS FEA.

- Właściwe zamodelowanie podłoża w posadowieniu konstrukcji ma duży wpływ na wyniki późniejszych analiz. Nie może być również to pominięte przy analizie dynamicznej konstrukcji kominów. Informacje nt. fundamentów są jednozdaniowe i dotyczą jedynie dwu konstrukcji – kominy o wysokości 120 i 180m. Dodatkowo komin o wysokości 180m posadowiony jest na palach Franki. Brak jest natomiast jakiegokolwiek informacji nt. rodzaju gruntu zalegającego pod fundamentami oraz sposobie posadowienia komina o wysokości 260m. Te informacje są niezbędne do określenia współczynnika pionowej sprężystości podłoża. Z powyższych względów proszę informację o sposobie zamodelowania podparcia konstrukcji, a szczególnie wartości współczynników sprężystości podłoża dla każdej z konstrukcji.
- Analizy zostały przeprowadzone programem obliczeniowym MIDAS FEA o światowej renomie. Niemalże wszystkie programy obliczeniowe mają bardzo dobrze rozbudowany tzw. pre- i postprocesor, co znakomicie obrazuje sposób pracy i zachowania się konstrukcji w bardzo złożonych stanach obciążenia. Dlaczego Doktorant nie wykorzystał chociaż w części możliwości stosowanego oprogramowania do zobrazowania wyników. W całej pracy są tylko dwa rysunki pokazujące, że takie modelowanie miało miejsce – rysunek 15 i 16. Proszę o komentarz w tej sprawie i może przedstawienie kilku obrazów np. naprężeń w konstrukcji w miejscu osłabień trzonu (rejon czopuchów) wywołanych pierwszą, drugą oraz trzecią postacią drgań i dla porównania bez wpływów dynamicznych.
- Ciekawym zagadnieniem jest wzbudzenie drgań komina  $h=120m$  przez ruch grupy osób (str. 56). Proszę o krótki komentarz i opis w jaki sposób to wzbudzenie było realizowane na obiekcie.
- W ramach analizy drgań wymuszonych na konstrukcję obiektów (podrozdział 7.1.1) Doktorant zakłada w celu skrócenia czasu obliczeń oraz uproszczenia analizy,

wymuszenie drgań tylko w jednym kierunku Y (str. 95, wd. 5). Trudne jest zweryfikowanie takiego, a nie innego wyboru, ponieważ niemożliwe jest umiejscowienie osi w stosunku do rzutu obiektu i położenie czopuchów kominów. Brak jest rysunków na ten temat, a opisy we wstępie nie rzucają światła na ten problem. Proszę o wyjaśnienie tej kwestii.

- Wykonana analiza THA do wstrząsu tektonicznego oraz górniczego została przedstawiona w formie tabelarycznej dla każdego segmentu każdej z konstrukcji (kominy o wysokości 120 i 260m). Wielkością przedstawioną i analizowaną w tablicach od 34 do 38 (str. 100-103) są naprężenia w płaszczu. Wyniki analiz wskazują na kilkukrotne przekroczenie wytrzymałości zastosowanych materiałów, np. dla komina o wysokości 120m i wstrząsu parasejsmicznego przekroczenia naprężeń w betonie są jedenastokrotne, a w stali zbrojeniowej trzykrotne. Z przedstawionych analiz wynika, że obie konstrukcje uległyby katastrofie, gdyby takie wymuszenie miało miejsce. Trochę zastanawia dość powściągliwy komentarz Doktoranta na ten temat. Proszę o rozszerzenie tego komentarza i może odpowiedź na pytanie jakie wymuszenie (jaki poziom przyspieszenia lub prędkości drgania) konstrukcje są w stanie jeszcze przenieść bezpiecznie. Taka informacja jest bardzo istotna z punktu widzenia właściciela obiektu i planowanych ewentualnych remontów obiektów.

#### **4.2. Uwagi szczegółowe**

Uwag szczegółowych jest dużo ponieważ praca wykonana jest starannie pod względem językowym. Do tych nielicznych uwag, które przedstawiono w kolejności pojawiania się w tekście, można zaliczyć:

- W spisie treści (str. 9) można zauważyć nieścisłość – brakuje rozdziału nr 10. Konsekwentnie brak ten występuje w treści pracy. Po rozdziale 9 – Wnioski (str. 108-109) pojawia się rozdział 11 – Bibliografia (str. 110-116);
- Na stronie 29 Doktorant powołuje się na niewłaściwe pozycje literaturowe [53] i [52]. Podobnie jest na str. 30 – odniesienie jest do pozycji [55-61], na stronie 39 opis Tablicy 1 – pozycje [55-58], na stronie 95 odniesieni do pozycji [54]. We wszystkich tych przypadkach liczba odniesienia powinna być i jeden większa;
- Na skutek automatyzmu formatowania tekstu strona 38 została pozbawiona indeksów przy np. wytrzymałości betonu oraz jonów siarczkowych;



- Na stronie 39 przedstawiono w tabelicy 1 wychylenie głowicy komina. Nie ma komentarza jednak dowiązania do układu współrzędnych lub czy jest to wychylenie ekstremalne i czy występuje ono w jednym kierunku w stosunku do osi konstrukcji;
- W tabelicy 4 (str. 42) przedstawiono ubytki grubości płaszcza betonu oraz wytrzymałość betonu w kominie o wysokości 180m dla dwu modeli. Niestety opis tych modeli pojawia się dopiero na stronie 47, co utrudnia czytelnikowi zrozumienie myśli Doktoranta. Dodatkowo w tej tabelicy brakuje opisu jednostek, i tak można domyślać się, że poziom segmentu podany jest w [m], wytrzymałość w [MPa], ale jednostka średniego ubytku grubości trudna jest do odgadnięcia. Proszę o wyjaśnienie tej kwestii;
- W całej pracy Doktorant stosuje znak dziesiętny w postaci kropki zgodnie z notacją anglosaską, co nie jest praktyka błędną. Jedynie na stronie 46 pojawiła się niekonsekwencja, gdzie zastosowano znak dziesiętny w postaci przecinka;
- Na stronie 47, prawdopodobnie na skutek zmiany edycji tekstu, pojawiło się słowo *mikrospękań*, a powinno być *mikrospękania*;
- Z językowego punktu widzenia lepiej byłoby użyć słowa *analizy* w miejsce *wdrożenia* w zdaniu „(...) *celem łatwiejszego wdrożenia wyników pracy.*” na stronie 47;
- Na stronie 49 Doktorant, przy okazji omawiania problemów sprężystości podłoża, powołuje się na normę, pozycja [36], której to pozycji nie ma w bibliografii;
- W rozdziale 4.4.1 na str. 50 pojawiło się zdanie „(...) wykorzystano model obliczeniowy komina  $h=180m$  *mojego autorstwa* (...)”. Ponieważ cała praca jest napisana w trybie bezosobowym (wykorzystano, analizowano, przyjęto ...), to nasuwa się pytanie, czy pozostałe modele kominów wysokościach 120 i 260m nie są modelami przygotowanymi przez Doktoranta? Proszę o krótki komentarz;
- W ramach omówienia obciążenia sejsmicznego (rozdział 7.1.2, str. 96) pojawiło się nieuprawnione użycie słowa „wymuszenia *parasejsmicznego*” w miejsce „wymuszenia *sejsmicznego*”.
- W bibliografii pojawiły się pozycje literaturowe, o których nie ma wzmianki w tekście pracy. Chodzi o następujące pozycje: [2], [5], [9], [13], [18], [21], [22], [25], [26], [29], [31], [33], [38], [39], [40], [45], [46], [49], [50], [51]. Łącznie 22 szt.

Uwagi szczegółowe nie wymagają ustosunkowania się Doktoranta do nich z wyjątkiem tych, dla których zostało to wyraźnie zaznaczone.



## 5. Podsumowanie oceny pracy i wniosek końcowy

Reasumując stwierdzam, że pomimo pewnych niedoskonałości pracy, które zostały przedstawione w uwagach ogólnych, zastrzeżenia te nie przesłaniają końcowej pozytywnej oceny recenzowanej rozprawy doktorskiej. Przedstawione przez Doktoranta podejście doświadczalno-numeryczne do analiz konstrukcji kominów przemysłowych zasługuje na rozpowszechnienie w celu stosowania go w praktyce inżynierskiej w ramach prac eksperckich. Duża biegłość Doktoranta w posługiwaniu urządzeniami rejestrującymi drgania oraz oprogramowaniem MIDAS są ze wszech miar godnymi uwagi umiejętnościami.

Podsumowując, stwierdzam, że praca doktorska Pana mgr inż. Bartłomieja Ratajewicza pod tytułem „*Wpływ eksploatacji na charakterystyki dynamiczne jednoprzewodowych żelbetowych kominów przemysłowych*” spełnia warunki i wymagania art. 13 ust. 1 Ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. 2003 nr 65, poz. 595, z późniejszymi zmianami).

Wnioskuje o przyjęcie rozprawy doktorskiej przez Radę Naukową Wydziału Inżynierii Lądowej Politechniki Krakowskiej w Krakowie oraz dopuszczenie Pana mgr inż. Bartłomieja Ratajewicza do publicznej obrony rozprawy doktorskiej.



Prof. dr hab. inż. Leszek Szojda

Gliwice, 22 czerwca 2022r.