

*Paweł Krzyworączka**

ANALIZA SIŁ I MOMENTÓW¹ DLA OKREŚLENIA WARUNKÓW BEZPIECZNEGO, KIERUNKOWEGO OBALANIA KOMINÓW METODĄ WYBUCHOWĄ

1. Wprowadzenie

Podczas obalania kominów najpoważniejszym zagrożeniem są: możliwość zmiany planowanego kierunku upadku oraz drgania wywołane uderzeniem komina o grunt [1, 2, 6–12].

Po wykonaniu włomu obalającego (tj. usunięciu metodą wybuchową około 2/3 podstawy komina) cały ciężar komina zostaje przeniesiony na strefę podporową, wynoszącą około 1/3 pierwotnej powierzchni przekroju komina. W dodatku naprężenia powstające w stopie podporowej (tj. powierzchni przekroju podstawy komina, na której komin stoi po wystrzeleniu włomu obalającego) mają charakter dynamiczny, różny od naprężeń statycznych (występujących, gdy komin stoi w miejscu, oparty na całym przekroju).

Aby dokonać szczegółowej analizy zachowania się komina po wykonaniu włomu obalającego i w czasie upadku, należy określić szereg parametrów. Są to między innymi:

- wysokość komina;
- średnice komina (zewnątrzna i wewnętrzna: u podstawy i wierzchołki, oraz średnice dla poszczególnych warstw komina);
- parametry zbrojeń znajdujących się w podstawie komina;
- materiał, z jakiego zbudowany jest komin (poszczególne jego warstwy);
- wytrzymałość na ściskanie materiału komina;
- parametry ciężaru zawieszonego na linie;
- długość i kąt nachylenia samej liny;
- prędkość i kierunek wiatru.

* Wydział Górnictwa i Geoinżynierii, Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków

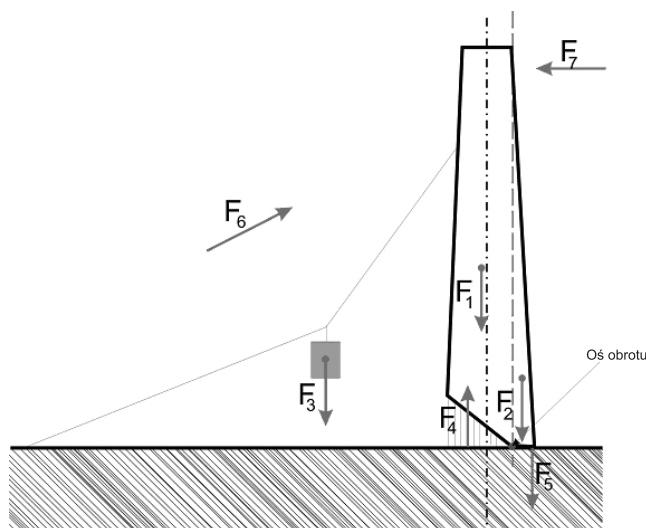
¹ Przez słowo moment w pracy rozumie się moment siły.

Proces upadku komina jest na tyle skomplikowany, iż postanowiono specjalnie na potrzeby tych analiz stworzyć komputerowy program obliczeniowy, nazwany KOMIN1.0 [6].

Analiza zmian momentów występujących podczas obalania kominów pozwoli lepiej poznać specyfikę upadku wyburzanych obiektów, między innymi wpływ wiatru na kierunek upadku, czas upadku komina oraz czas przebycia np. pierwszych 10° , prędkość komina w chwili uderzenia o grunt, energię upadku komina, wpływ ciężaru zawieszonego na linie na kierunek, czas i energię upadku.

2. Charakterystyka momentów występujących podczas obalania kominów

Podczas obalania kominów żelbetowych przy użyciu MW, po wykonaniu tzw. włomu obalającego, zaczyna oddziaływać 7 momentów sił (6, gdy jest bezwietrznie) [6, 10]. Momenty te determinują upadek komina. Na rysunku 1 zaznaczono schematycznie siły występujące po wykonaniu włomu obalającego. Oznaczono je symbolami F_1 – F_7 .



Rys. 1. Ogólny schemat sił występujących podczas obalania komina

2.1. Momenty pochodzące od ciężarów sprzyjających i przeciwdziałających obalaniu M_1 i M_2

Moment M_1 jest momentem pochodzącym od ciężaru komina, znajdującego się po stronie włomu obalającego, dlatego będzie nazywany momentem ciągnącym lub sprzyjającym obalaniu. Moment ten podczas obalania komina ulega zmianie — jego wartość rośnie i osiąga maksimum w momencie uderzenia komina o grunt.

Moment od ciężaru przeciwdziałającego obalaniu M_2 znajduje się po stronie stopy oporowej, będzie on nazywany momentem przeciwdziałającym obalaniu lub momentem trzymającym. Jego wartość podczas upadku komina maleje, w momencie uderzenia komina o grunt moment M_2 osiąga wartość zerową.

Obliczenia momentów M_1 i M_2 połączono ze sobą, ponieważ są ze sobą ściśle powiązane. Dotyczą masy komina, które przedziela płaszczyzna pionowa, poprowadzona przez oś obrotu komina. Ciężar od masy znajdującej się po stronie włomu obalającego (kierunku padania komina) sprzyja obalaniu, natomiast ciężar od masy z drugiej strony płaszczyzny obrotu komina (od strony stopy oporowej) — przeciwdziała obalaniu.

Obliczenie sił i momentów sił działających na komin po wykonaniu włomu obalającego jest wysoce skomplikowane i mało prawdopodobne jest, aby udało się je opisać za pomocą jednego prostego wzoru. Ponadto ilość działań matematycznych potrzebnych do wykonania tego zadania jest tak duża, iż niemożliwe staje się policzenie wszystkiego bez pomocy komputera i odpowiedniego oprogramowania. Poza tym, tysiące działań matematycznych i dziesiątki tysięcy wpisywanych liczb praktycznie uniemożliwiałyby wykonanie obliczeń bezbłędnie. Dlatego postanowiono stworzyć arkusz kalkulacyjny, który — ze względu na swoją specyfikę — można nazywać programem obliczeniowym, ułatwiającym i diametralnie przyspieszającym wszelkie obliczenia [6].

Dokonano analizy, dzieląc umownie komin na poziome „plastry”, o wysokości 0,1 m każdy. Dla komina o wysokości np. 100 m będzie to podział na 1000 elementów. Podziału umownego, co 0,1 m, dokonano w tym celu, aby błąd obliczeń związany z przyjętą techniką obliczeń był na tyle mały, by można było go zaniedbać.

Znając momenty sprzyjające i przeciwnie obalaniu, pochodzące od poszczególnych warstw komina można, dla każdej z osobna, znaleźć moment wypadkowy, pochodzący od ciężarów, czyli momenty M_1 i M_2 . Należy zsumować wszystkie momenty cząstkowe ciągnące i odjąć od nich sumę momentów trzymających.

Szczegółowe obliczenia wykonano w programie komputerowym KOMIN 1.0.

2.2. Moment pochodzący od ciężaru zawieszonego na linii M_3

Moment pochodzący od ciężaru zawieszonego na linii M_3 , stosowanego w celu zdeteminowania kierunku upadku komina, jest momentem sprzyjającym obalaniu komina. Jego wartość w miarę pochylania się komina maleje, by osiągnąć wartość zerową w momencie zetknięcia się ciężaru z ziemią.

Ciężar na linie zwiększa prawdopodobieństwo właściwego (kierunkowego) obalenia komina, jednak nie stanowi całkowitej gwarancji; jest jedynie środkiem pomocniczym.

Po wykonaniu włomu obalającego (lub w trakcie jego wykonywania) może nastąpić miażdżenie stopy oporowej [10]. Ewentualne miażdżenie stopy oporowej jest zjawiskiem wysoce niebezpiecznym i stanowi największe zagrożenie podczas obalania kominów. W momencie miażdżenia stopy oporowej kierunek upadku może ulec zmianie, a w skrajnym przypadku komin może paść w zupełnie niekontrolowaną stronę. Należy zaznaczyć, iż w czasie miażdżenia stopy oporowej komina następuje nieznaczne przechylenie komina w kierunku padania, będące wypadkową działania siły ciężkości i momentów działających na komin, dla-

tego kominy likwidowane metodą wybuchową, nawet w przypadku wystąpienia zjawiska miażdżenia stopy oporowej, zazwyczaj padają we właściwym, wcześniej ustalonym kierunku.

W większości przypadków kierunek upadku wyburzanego komina musi być ściśle zachowany ze względu na obecność obiektów chronionych w pobliżu wyburzanego komina.

W czasie miażdżenia stopy oporowej moment ciągnący komin w żądanym kierunku (będący wypadkową momentów składowych) ulega zmianie, na skutek przesuwania się linii obrotu komina. W skrajnym przypadku moment wypadkowy może zmaleć do zera lub osiągnąć nawet wartości ujemne. Taka sytuacja występuje wtedy, gdy momenty przeciwdziałające obalaniu są większe od momentów sprzyjających obalaniu; w takich przypadkach decydującą rolę może odegrać ciężar zawieszony na linie. Miażdżenie stopy oporowej nie ma istotnego wpływu na wielkość momentu od ciężaru na linie.

Moment od ciężaru zawieszonego na linie ma największe znaczenie w czasie pierwszych kilku stopni wychylenia komina (upadku komina). Moment ten, wraz ze wzrostem kąta nachylenia komina, szybko maleje i osiąga wartość 0 dla kąta około 15° – 25° (w zależności od wysokości zawieszenia ciężaru, długości liny itd.).

Aby znaleźć moment od ciężaru zawieszonego na linie przy danym kącie wychylenia komina, należy znaleźć położenie ciężaru, tj. jego wysokość w danej chwili nad powierzchnią gruntu oraz odległość od linii obrotu komina.

2.3. Moment pochodzący od zbrojeń znajdujących się w strefie włomu M4

Kolejny moment przeciwdziałający obalaniu M4 pochodzi od prętów zbrojeniowych znajdujących się w strefie włomowej. Po zdetonowaniu ładunków MW w otworach strzałowych w strefie włomowej zostaje utworzony włom obalający. Ładunki MW w otworach są na tyle duże, aby skruszyły i wyrzuciły (a raczej przecisnęły) beton pomiędzy zbrojeniami. Po strzale w strefie włomowej pozostają zbrojenia, które — na skutek działania detonacji MW — są w bliżej nieokreślony sposób powyginane. Zbrojenia te przeciwdziałają obalaniu, działając na zginanie i/lub wyboczenie.

Przed wykonaniem strzelania obalającego najczęściej wykonuje się tzw. strefę obrotu. Są to dwie symetryczne wnęki, wykonane sposobem strzałowym lub mechanicznym po obu stronach komina. Strefę obrotu tworzy się z kilku powodów:

- aby oś obrotu komina była precyzyjnie wyznaczona;
- aby usunąć pręty zbrojeniowe w obrębie strefy obrotu. Pręty te, z powodu niewielkich wysokości, powodowałyby powstanie znacznych momentów przeciwdziałających obalaniu, ponieważ siły wyboczeniowe dla tych prętów miałyby dużą wartość. Poza tym, nierównomierne wyginanie (wyboczenie) prętów zbrojeniowych w obrębie strefy obrotu mogłoby mieć wpływ na zmianę kierunku padania komina;
- aby zmniejszyć ilość MW używanego przy strzelaniu obalającym.

W celu obliczenia momentu M4 należy obliczyć i zsumować momenty pochodzące od wszystkich zbrojeń znajdujących się w strefie włomowej (nie licząc zbrojeń znajdujących się w obrębie strefy obrotu, ponieważ zostaną one przed obalaniem komina przepalone).

Moment od wyginanych i wyboczanych zbrojeń działa tylko w początkowej fazie upadku komina.

2.4. Moment pochodzący od rozciąganych zbrojeń i betonu, znajdujących się w stopie oporowej M5

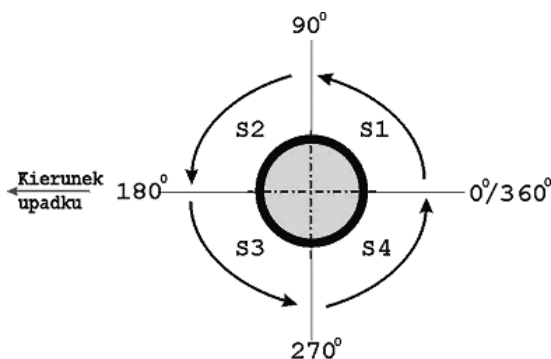
Moment M5, pochodzący od betonu i zbrojeń znajdujących się w stopie oporowej, jest momentem przeciwdziałającym obalaniu komina. Aby wyznaczyć wartość momentu M5, należy wyznaczyć algorytm na obliczanie momentu pochodzącego od rozciąganych zbrojeń i betonu.

Dla wyznaczenia wartości momentu potrzebnego do rozerwania betonu w stopie oporowej należy określić pole powierzchni stopy oporowej (dla betonu), odległość środka ciężkości stopy oporowej od osi obrotu komina oraz siłę trzymającą, pochodzącą od wytrzymałości betonu na rozciąganie. Moment ten działa tylko w początkowej fazie upadku komina.

W celu określenia momentu powodującego rozerwanie zbrojeń znajdujących się w stopie oporowej należy obliczyć: pole przekroju poprzecznego pręta zbrojeniowego, wytrzymałość pręta, odległości poszczególnych prętów od osi obrotu komina, momenty związane z rozrywaniem poszczególnych prętów oraz moment sumaryczny. Moment ten działa głównie w początkowej fazie upadku komina.

2.5. Moment pochodzący od naporu wiatru M6

Moment związany z ewentualnym wiatrem, jaki może wystąpić w dniu wyburzenia komina, oznaczono jako M6. Moment ten — w zależności od kierunku wiatru — może mieć różnoraki charakter: sprzyjający obalaniu, przeciwdziałający obalaniu lub zmieniający kierunek upadku komina. Może również wystąpić kombinacja dwóch czynników, np. wiatr sprzyjający obalaniu z jednoczesnym działaniem zmieniającym kierunek upadku komina.



Rys. 2. Oznaczenia dla kierunku wiatru

Aby obliczyć moment od wiatru, należy znać dwa parametry: prędkość i kierunek wiatru. Kierunek wiatru (kąt) należy określać zgodnie z rysunkiem 2. Kąt oznacza się od 0 do 360° w kierunku przeciwnym do ruchu wskazówek zegara, licząc od kierunku padania komina dla wiatru sprzyjającego obalaniu (wiatr wiejący „w plecy” obalanego komina — rys. 2).

Kierunki, z jakich wieje wiatr, podzielono na 4 strefy — S1 do S4 (rys. 2). Wiatr wiejący w strefach S1 i S4 sprzyja obalaniu, wiatr wiejący w strefie S2 lub S3 przeciwdziała obalaniu komina.

Gdy mamy do czynienia z wiatrem wiejącym w strefie S2 lub S3, konieczne staje się powiązanie działania siły wiatru z siłą pochodzącą od oporów powietrza, czyli z momentem M_7 , dlatego że siła naporu powietrza zależy m.in. od współczynnika oporu c_x , który z kolei zależy od prędkości [3]. Jeśli wiatr wieje w strefie S2 lub S3 (przeciwdziała obalaniu), prędkość wiatru i prędkość upadającego komina sumują się, a tym samym krytyczna prędkość, przy której współczynnik oporu c_x maleje z 1,0 do 0,35 [3], jest sumą prędkości wiatru i prędkości padającego komina.

O ile średnia prędkość wiatru (nie uwzględniając jej ewentualnych zmian w czasie upadku komina) jest względnie stała, o tyle prędkość komina na różnej jego wysokości jest zróżnicowana. Prędkość kątowna jest dla całego komina w danej chwili teoretycznie taka sama (jeśli nie uwzględniać ugięcia się komina podczas upadku), natomiast prędkość liniowa jest zmienna: największą prędkość liniową ma końcówka, a najmniejszą elementy znajdujące się u podstawy komina.

Znając wzór na moment zmieniający kierunek upadku komina, można wyznaczyć odchylenie jego końcówki od zamierzonego kierunku jego padania. W tym celu należy zsumować geometrycznie, dla każdego kąta nachylenia komina osobno, moment wypadkowy oraz moment zmieniający kierunek upadku komina.

2.6. Moment pochodzący od oporów powietrza M_7

Moment związany z oporami powietrza jest momentem powstrzymującym, tzn. przeciwdziała obalaniu. Ponieważ prędkość liniowa poszczególnych warstw komina (tzn. na różnej wysokości) jest zmienna, konieczne staje się obliczenie oporu osobno dla poszczególnych warstw komina. Dla każdej warstwy obliczana jest w danej chwili (przy danym kącie przechylenia komina) prędkość liniowa (do której ewentualnie dodawana jest składowa prostopadła do komina, pochodząca od siły wiatru), siła oporu oraz moment będący iloczynem siły oporu danej warstwy i jej odległości od osi obrotu komina.

Dla realizacji tego celu najpierw należy znaleźć przyspieszenie kątowne komina dla kąta pochylenia od 0 do 90°. Przyspieszenie kątowne komina jest zmienne i zależy między innymi od momentów działających na komin.

Dynamiczne równanie ruchu obrotowego bryły sztywnej ma postać [4]

$$I\varepsilon = \sum M \quad (1)$$

gdzie:

- I — moment bezwładności bryły względem osi obrotu, $\text{kg} \cdot \text{m}^2$;
- ε — przyspieszenie kątowne, $1/\text{s}^2$;
- $\sum M$ — suma momentów sił działających na ciało, $\text{N} \cdot \text{m}$.

Dla obliczenia przyspieszenia kątownego komina konieczna jest znajomość wartości momentów w danej chwili oraz moment bezwładności komina [5]. Przyspieszenie kątowe komina względem osi obrotu (osi obalania komina) podczas upadku zmienia się w sposób ciągły, osiągając w każdej chwili (dla każdej wartości kąta nachylenia komina) różną wartość. Taka sytuacja sprawia, iż optymalne byłoby zastosowanie do obliczenia czasu upadku komina rachunku różniczkowo-całkowego. W niniejszym opracowaniu postanowiono postąpić inaczej, tzn. podzielono upadek komina na skończone odcinki (co $0,1^\circ$).

3. Program obliczeniowy KOMIN 1.0

Algorytm opracowany na obliczanie momentów występujących podczas upadku komina jest bardzo skomplikowany. Ręczne obliczenie wszystkich parametrów byłoby niemożliwe ze względu na czas potrzebny na ich przeprowadzenie. Arkusz kalkulacyjny stworzony na potrzeby niniejszej analizy składa się z dziesiątków tysięcy komórek, a proces przeliczeniowy powtarzany jest 900 razy, tzn. dla kąta pochylenia komina w zakresie $0\div 90^\circ$, co $0,1^\circ$.

Bardzo szerokie zastosowanie w programie znalazły funkcje logiczne (szczególnie funkcja „JEŻELI”). Dzięki nim wykonano wiele obliczeń wariantowych, tzn. program sprawdzał wybrany parametr i w zależności od jego wartości (np. przynależności do wyznaczonego przedziału) stosował określony wariant obliczeniowy. Zastosowano również kilkakrotne zagnieżdżenie funkcji „JEŻELI”.

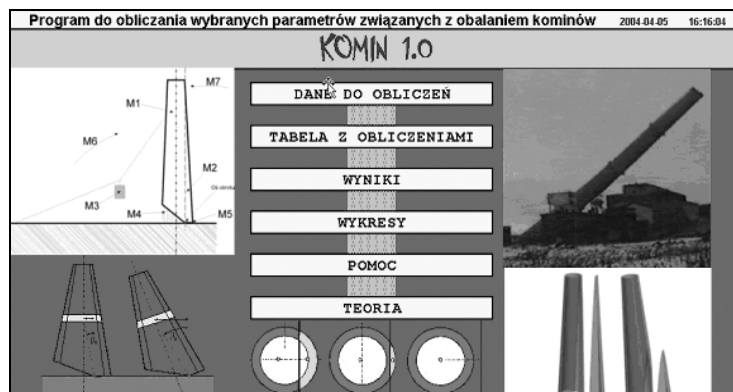
Najważniejszą rolę w programie KOMIN 1.0 odgrywają tzw. makropolecenia (czyli makra). Używając programu Microsoft Visual Basic stworzono zestaw makr wspomagających proces obliczeń i zapisu wyników. Jeśli jakieś zadania są często powtarzane w programie Microsoft Excel, to można zautomatyzować ich wykonywanie za pomocą makra. Utworzono zestaw makr, mających za zadanie:

- wstawianie kąta pochyłu komina do tabeli obliczeń,
- wykonanie obliczeń i wklejenie wyników do osobnej tabeli,
- ponowne wstawienie kąta pochylenia komina, wykonanie obliczeń itd.

Stworzono 90 makr, każde odpowiedzialne za 1° pochyłu komina w zakresie od 0 do 90° . Następnie utworzono tzw. makro zbiorcze, tzn. makro, którego zadaniem jest uruchomienie po kolei 90 makr podstawowych.

Program KOMIN 1.0 składa się ze strony głównej oraz 6 modułów, którymi są (rys. 3):

- „DANE DO OBLICZEŃ”,
- „TABELA Z OBLICZENIAMI”,
- „WYNIKI”,
- „WYKRESY”,
- „POMOC”
- „TEORIA”.



Rys. 3. Okno główne programu KOMIN 1.0

4. Analiza wyników

Analiza sił i momentów występujących podczas obalania kominów pozwoliła wyznaczyć szereg zależności współczynników oraz odpowiedzieć na kilka istotnych pytań.

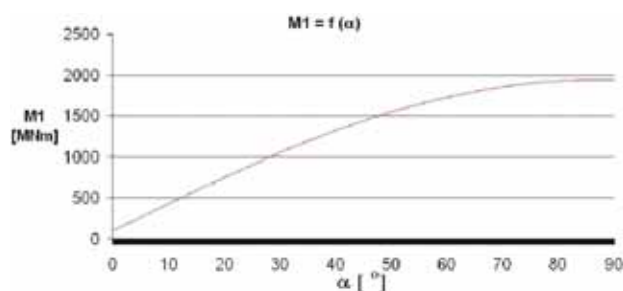
Analizę wyników podzielono na kilka etapów dotyczących różnorodnych zagadnień związanych z obalaniem kominów.

4.1. Momenty działające na komin w zakresie kąta upadku $0 \div 90^\circ$

Program KOMIN 1.0 pozwala między innymi znaleźć wartości momentów występujących podczas upadku komina. Jak wcześniej stwierdzono, podczas upadku komina występuje 7 momentów, mających wpływ między innymi na czas i kierunek upadku komina.

Przeprowadzono przykładowe obliczenia dla komina żelbetowego o wysokości 100 m, średnicy zewnętrznej u podstawy 11 m i u wylotu 7 m. Zależności poszczególnych momentów od kąta nachylenia komina pokazano na rysunkach 4–8.

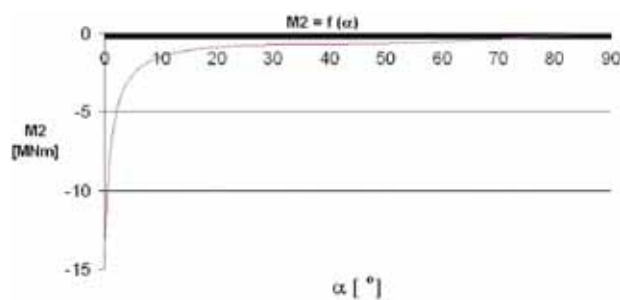
Decydującą rolę podczas upadku komina odgrywa moment od ciężaru ciągnącego komin M_1 (rys. 4).



Rys. 4. Wykres zależności momentu M_1 od kąta nachylenia komina

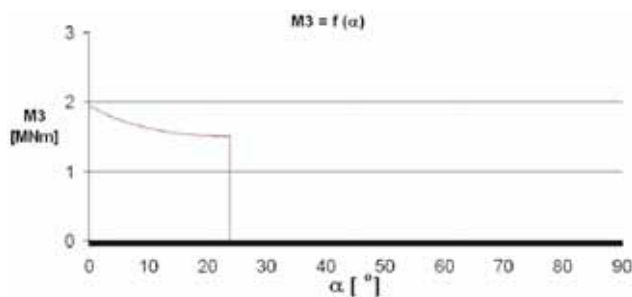
Wartość momentu M_1 rośnie parabolicznie od momentu strzału do uderzenia komina o podłoże. Dla przykładowego komina wartość momentu M_1 zmienia się od $110,5 \text{ MN} \cdot \text{m}$ (po wykonaniu włomu obalającego) do $1940,4 \text{ MN} \cdot \text{m}$ (w momencie uderzenia komina o grunt).

Moment od ciężaru trzymającego komin ma największe znaczenie w początkowej fazie upadku komina (rys. 5). Dla rozpatrywanego komina moment ten zmienia się w zakresie od $13,6$ do $0 \text{ MN} \cdot \text{m}$.



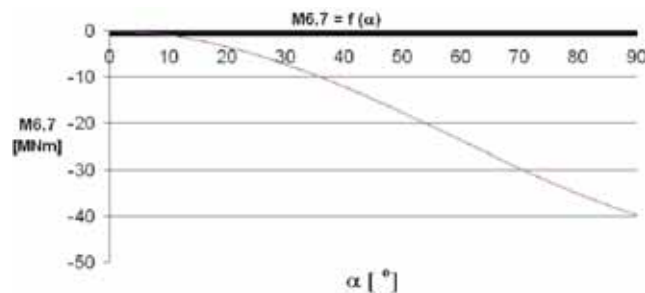
Rys. 5. Zależność momentu M_2 od kąta nachylenia komina

Moment od ciężaru zawieszonego na linie (oznaczony jako M_3 — rys. 6) największą wartość osiąga na początku (gdy komin stoi w miejscu), w czasie pochyłania się komina maleje i osiąga wartość zerową w momencie zetknięcia się ciężaru z podłożem.



Rys. 6. Zależność momentu M_3 od kąta nachylenia komina

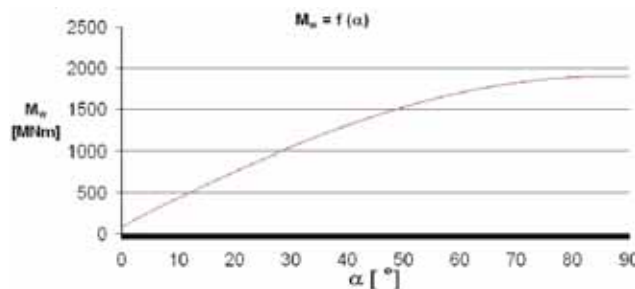
Wykres zależności momentów pochodzących od oporów powietrza i ewentualnego wiatru (M_6 i M_7) dla różnych kątów pochylenia komina pokazano na rysunku 7. Założono prędkość wiatru na poziomie 10 m/s , a kierunek wiatru 90° — czyli prostopadle do kierunku padania komina. Przyjęty kierunek wiatru wpływa tylko na zmianę kierunku padania komina. Moment od oporów powietrza rośnie od 0 (gdy komin stoi w miejscu) do $39,8 \text{ MN} \cdot \text{m}$ (w momencie uderzenia o podłoże).



Rys. 7. Zależność momentów M6 i M7 od kąta nachylenia komina

Z analizy wykresów wynika, iż największe znaczenie ma pierwsze kilka stopni ruchu komina, ponieważ w dalszej fazie upadku moment ciągnący (M_1) staje się decydującym i całkowicie determinuje upadek komina.

Moment wypadkowy — będący sumą wszystkich momentów składowych — zmienia się w zakresie $79,2 \div 1905,5 \text{ MN} \cdot \text{m}$ (rys. 8). W końcowej fazie upadku komina moment wypadkowy równy jest różnicy momentu ciągnącego M_1 oraz momentów pochodzących od oporów powietrza (M_6) i wiatru (M_7).



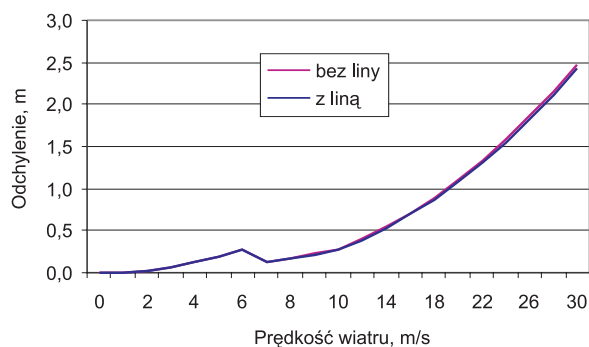
Rys. 8. Zależność momentu wypadkowego od kąta nachylenia komina

4.2. Wpływ wiatru na kierunek upadku

Przeprowadzono przykładowe obliczenia wpływu wiatru na kierunek upadku komina. Obliczono odchylenie komina o wysokości 100 m przy prędkości wiatru w przedziale od 1 do 30 m/s ($3,6 \div 108 \text{ km/h}$). Wyniki przedstawiono na rysunku 9. Obliczona wartość odchylenia od wyznaczonego kierunku padania dotyczy końcówki komina. Przeprowadzono obliczenia w dwóch wariantach: bez ciężaru zawieszonego na linie oraz z ciężarem. Celem obliczeń było ustalenie, czy ciężar zawieszony na linie ma wpływ na zachowanie kierunku upadku przy wiejącym wietrze.

Analizy wykazały, iż wiatr ma znikomy wpływ na kierunek padania komina. Przy założeniu najbardziej niekorzystnej sytuacji, a mianowicie przy wietrze wiejącym prostopadle

do kierunku padania komina, dla wiatru o prędkości np. 10 m/s (36 km/h), odchylenie końcówki komina o wysokości 100 metrów wyniesie jedynie około 0,3 m. Wpływ wiatru na kierunek padania komina można praktycznie pominąć.



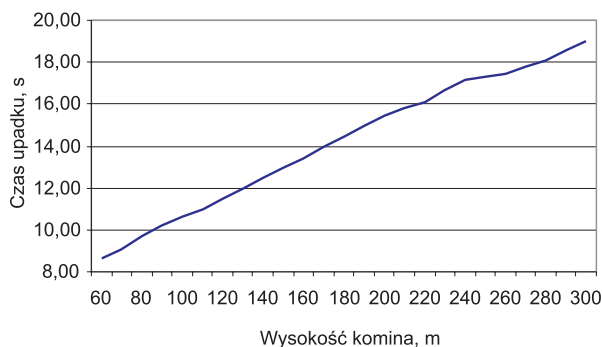
Rys. 9. Zależność odchylenia końcówki komina $H = 100$ m od prędkości wiatru

Zastosowanie ciężaru zawieszonego na linie, w celu zapewnienia dodatkowego momentu ciągnącego komin w żądanym kierunku, ma minimalny wpływ na redukcję odchylenia komina spowodowanego wiatrem. Zastosowanie ciężaru zmienia odchylenie końcówki komina o około 1÷2%.

4.3. Czas upadku komina, jak i czas przebycia np. pierwszych 10°

Program KOMIN 1.0 pozwala obliczyć z dużą dokładnością czas upadku wyburzanego komina.

Zależność czasu upadku komina od jego wysokości pokazano na rysunku 10. Jak widać, zależność ta jest praktycznie liniowa. Niewielkie odchylenia wyników od linii prostej można tłumaczyć doбором parametrów komina do obliczeń.



Rys. 10. Zależność czasu upadku komina od wysokości komina

Przeprowadzono analizę regresji wykresu przedstawionego na rysunku 10. Zastosowano prostoliniową linię trendu, dla której współczynnik R^2 wynosi 0,9934, co świadczy o bardzo dobrym dopasowaniu linii do danych. Zależność przyjmuje postać równania

$$t = 0,4343x + 8,5254 \quad (2)$$

gdzie t — czas upadku.

Następnie ustalono zależność pomiędzy x z równania (2) a wysokością komina. Zależność ta jest całkowicie liniowa ($R^2 = 1$).

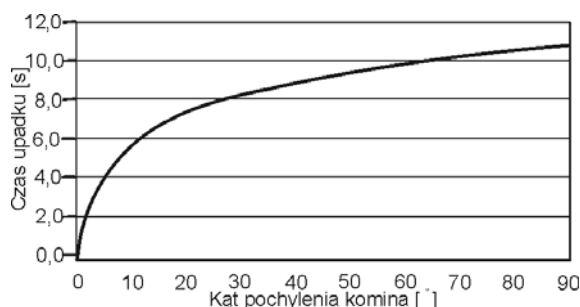
Sformułowano wzór na czas upadku komina w zależności od wysokości komina

$$t = 0,042H + 6,4 \quad (3)$$

Należy podkreślić, iż teoretyczny czas upadku komina, wyliczony ze wzoru (3), jest prawdziwy dla kominów o wysokości powyżej 60 m.

Zaznacza się, iż otrzymany wzór daje wyniki przybliżone ($\pm 3\%$), które są w większości przypadków zadowalające. W razie konieczności obliczenia dokładnego czasu upadku komina zaleca się skorzystanie z programu KOMIN 1.0.

Niekiedy może zaistnieć konieczność poznania zarówno całkowitego czasu upadku komina, jak i czasu przebycia np. pierwszych 10° przez upadający komin. Taka sytuacja może mieć miejsce np. wtedy, gdy wyburzanych jest kilka obiektów równocześnie (w tym przynajmniej jeden komin) i istnieje konieczność zsynchronizowania ich upadku. Na rysunku 11 pokazano wykres zależności czasu upadku komina o wysokości 100 m od kąta pochylenia komina.



Rys. 11. Rozkład czasu upadku komina $H = 100$ m w zależności od kąta pochylenia komina

Jak widać, czas wychylenia się komina o pierwsze 10° (około 6 s) jest mniej więcej równy połowie czasu upadku komina (około 12 s). Wykres ma kształt paraboliczny, co jest bezpośrednio związane z przyspieszeniem liniowym komina. Przyspieszenie liniowe końcówki komina, w początkowej fazie upadku, ma bardzo małą wartość (rzędu $0,2 \text{ m/s}^2$) i wzrasta w czasie upadku komina (do wartości $6\div 7 \text{ m/s}^2$). Ponieważ przyspieszenie liniowe

ruchu komina — zwłaszcza w początkowej jego fazie — ma dużo mniejszą wartość w porównaniu do przyspieszenia ziemskiego, dlatego w momencie, gdy stopa oporowa, po wykonaniu włomu obalającego, nie wytrzyma ciężaru komina, komin „siada” i jednocześnie ulega nieznacznemu przechyleniu, będącemu wypadkową siły ciężkości i sił działających na komin po podcięciu.

4.4. Prędkość komina w chwili uderzenia o grunt

Aby wyznaczyć energię upadku wyburzanego komina, należy znać prędkość środka ciężkości komina w momencie uderzenia o podłoże.

Dotychczas stosowano zależność równowagi energetycznej [7], wychodząc z założenia, że energia potencjalna komina (jaką posiada komin, gdy stoi w miejscu) zostanie całkowicie przekształcona w energię kinetyczną (jaką ma komin w momencie uderzenia o grunt). W rzeczywistości prędkość końcowa będzie nieco mniejsza, co jest związane między innymi z oporami powietrza.

Przeprowadzono obliczenia prędkości środka ciężkości komina w chwili uderzenia o grunt dla kominów o wysokości 60÷300 m w dwóch wariantach (rys. 12): wykonując obliczenia wg założenia równowagi energetycznej (wariant 1) i za pomocą programu KOMIN 1.0 (wariant 2).

Wyniki otrzymane za pomocą obydwu wariantów różnią się między sobą o około 18÷21%. Analizując otrzymane wyniki, sformułowano uproszczony wzór na prędkość środka ciężkości komina w momencie uderzenia o podłoże

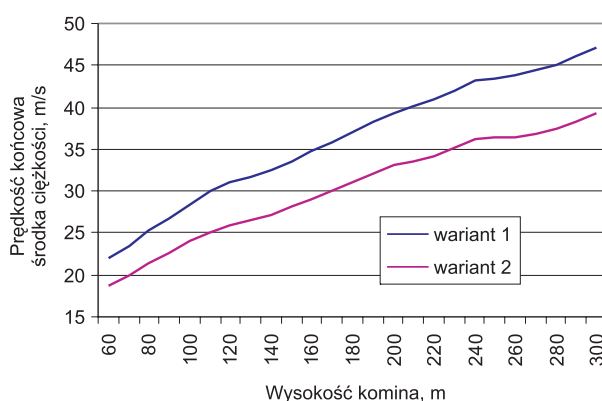
$$V = 0,84\sqrt{2gh} \quad (4)$$

gdzie:

V — prędkość końcowa środka ciężkości komina, m/s,

g — przyspieszenie ziemskie, m/s²,

h — wysokość środka ciężkości komina, m.

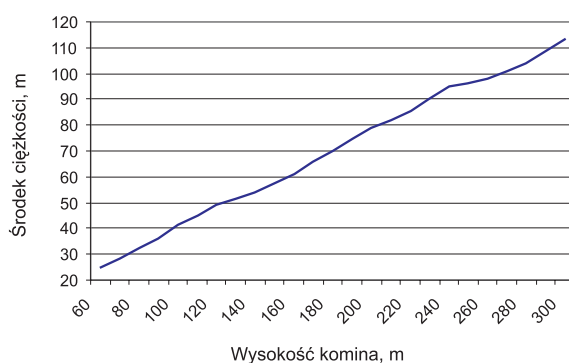


Rys. 12. Zależność prędkości końcowej środka ciężkości komina od wysokości komina

Część energii upadku komina zostaje skumulowana w postaci energii sprężystej naprężeń w płaszczu komina. Naprężenia te są źródłem przyspieszania ruchu komina w ostatniej fazie jego padania.

4.5. Środek ciężkości komina

Postanowiono sformułować ogólną zależność między wysokością komina a jego środkiem ciężkości. Podobnie jak poprzednio, obliczenia przeprowadzono dla kominów o wysokości 60÷300 m (rys. 13). Jak widać, zależność ta jest niemal liniowa, a niewielkie odchylenia od prostej można tłumaczyć przyjętymi do obliczeń parametrami kominów.



Rys. 13. Zależność wysokości środka ciężkości komina od wysokości komina

Obliczono tzw. współczynnik środka ciężkości komina, który określono jako iloraz położenia środka ciężkości i wysokości komina. Współczynnik ten waha się od 0,37 do 0,41. Przyjęto wartość średnią ważoną z obliczeń, tj. 0,4. Uproszczony wzór na wysokość środka ciężkości komina można zapisać następująco

$$h_{sc} = 0,4H \quad (5)$$

gdzie:

h_{sc} — wysokość środka ciężkości komina, m,
 H — wysokość komina, m.

Błąd uzyskiwany podczas obliczeń za pomocą wzoru (5) oscyluje w granicach 0÷8%, tak więc można go stosować dla przybliżonej oceny wysokości środka ciężkości kominów.

4.6. Wpływ ciężaru zawieszonego na linie na kierunek, czas i energię upadku komina

Jak wcześniej wykazano, ciężar zawieszony na linie w celu ukierunkowania upadku komina nie ma praktycznie żadnego wpływu na kompensację zmiany kierunku upadku komina spowodowaną ewentualnym wiatrem.

Przeprowadzono analizy wpływu wiatru na czas, energię i kierunek upadku komina. Wykonano przykładowe obliczenia dla kominów o wysokości 100, 200 i 300 m w dwóch wariantach: z ciężarem zawieszonym na linie (29,43 kN) i bez ciężaru.

Obliczenia wykazały, iż czas upadku komina obliczony dla wariantu z ciężarem różni się mniej niż 3% od czasu dla wariantu bez ciężaru, tak więc wpływ ciężaru zawieszonego na linie na czas upadku komina jest pomijalnie mały.

Podobnie wygląda sytuacja z prędkością końcową środka ciężkości komina — różnice pomiędzy obydwoma wariantami nie przekraczają 1%. Wpływ ciężaru zawieszonego na linie na energię upadku komina będzie również znikomy — można go zatem pominąć.

Analizy wyraźnie wskazują, iż ciężar na linie nie ma znaczącego wpływu na czas i energię upadku komina. Rola ciężaru zawieszonego na linie jest jednak bardzo istotna z innego powodu. Mianowicie po wykonaniu włomu obalającego może nastąpić miażdżenie stopy oporowej komina. W takim przypadku oś obrotu komina przesuwa się w stronę osi symetrii komina, co pociąga za sobą zmniejszenie momentów ciągnących komin w żądanym kierunku. Dodatkowo momenty przeciwdziałające obalaniu komina ulegają zwiększeniu (np. moment od zbrojeń w stopie oporowej). „Siadnięcie” komina już o 0,5 m może spowodować, że wielkość momentów trzymających będzie większa od momentów ciągnących komin. W takiej sytuacji komin przewróci się, jednak kierunek upadku może być dość przypadkowy.

Ciężar zawieszony na linie odgrywa istotną rolę w kierunku padania komina, bowiem jego udział w całkowitym momencie ciągnącym radykalnie wzrasta. Moment od ciężaru jest niezależny od zachowania się stopy oporowej komina — nawet po zmiążdżeniu stopy oporowej nadal ciągnie komin w żądanym kierunku.

5. Wnioski

Analiza sił i momentów sił występujących w czasie obalania kominów żelbetowych pozwoliła na opracowanie kilku istotnych kwestii, dotychczas pomijanych lub błędnie interpretowanych.

Stwierdzono między innymi, że:

- w czasie upadku komina występuje 7 głównych momentów determinujących jego upadek;
- najistotniejsze dla zachowania się komina jest kilka pierwszych stopni jego pochylenia;
- decydujący wpływ na upadek komina ma moment pochodzący od ciężaru ciągnącego komin (M_1);
- wiatr ma znikomy wpływ na kierunek padania komina i można go praktycznie pominąć;
- przybliżony czas upadku komina można obliczyć wzorem (3);
- czas wychylenia się komina o pierwsze 10° jest mniej więcej równy połowie czasu upadku komina;
- przyspieszenie liniowe końcówki komina w początkowej fazie upadku ma bardzo małą wartość i wzrasta w czasie upadku komina; ma ono — zwłaszcza w początkowej fazie ruchu komina — dużo mniejszą wartość niż przyspieszenie ziemskie;
- przybliżoną prędkość środka ciężkości komina w momencie uderzenia o grunt można obliczyć wzorem (4);
- energia upadku komina wynosi około $0,7 \div 1,0$ jego energii potencjalnej; w niniejszym opracowaniu przyjęto wartość średnią, tj. $0,85 \cdot m \cdot g \cdot h$;

- środek ciężkości komina znajduje się na poziomie około 0,4 wysokości komina;
- wpływ ciężaru zawieszonego na linie na czas upadku komina jest pomijalnie mały;
- wpływ ciężaru na linie na energię upadku komina jest znikomy — można go pominąć;
- nawet nieznaczne obniżenie komina może spowodować, iż wielkość momentów trzymających będzie większa od momentów ciągnących komin; w takiej sytuacji komin przewróci się, jednak zamierzony kierunek upadku komina może ulec zmianie;
- ewentualne zmiażdżenie stopy oporowej komina ma znikomy wpływ na moment od ciężaru zawieszonego na linie, mającego za zadanie ukierunkowanie upadku komina — moment pochodzący od ciężaru nadal ciągnie komin w żądanym kierunku, dlatego rola ciężaru jest bardzo istotna;
- analiza sił i momentów sił oraz innych parametrów komina pozwala przewidzieć jego zachowanie się po wykonaniu włomu obalającego, co umożliwia przedsięwzięcie środków zwiększających bezpieczeństwo powalania komina.

LITERATURA

- [1] *Andrzejewski J.*: Zastosowanie techniki strzelniczej w pracach wyburzeniowych — technologia wykonywania prac, zagrożenia i metody ich ograniczenia. AGH, Kraków 1990/91 (praca dyplomowa)
- [2] *Budycz L.*: Projektowanie robót strzelniczych inżynierskich. AGH, Kraków 1986 (praca dyplomowa)
- [3] *Bukowski J.*: Mechanika płynów. PWN, Warszawa 1976
- [4] *Engel Z., Giergiel J.*: Dynamika. AGH, Kraków 1997
- [5] *Engel Z., Giergiel J.*: Statyka. AGH, Kraków 1997
- [6] *Krzyworączka P.*: Analiza rozkładu sił i momentów przy obalaniu kominów żelbetowych metodą wybuchową. Międzynarodowa Konferencja nt. Trhacia Technika, Stara Leśna 2004
- [7] *Krzyworączka P.*: Problem drgań parasejsmicznych wywołanych upadkiem wyburzanych obiektów. AGH, Kraków 2001 (praca magisterska)
- [8] *Krzyworączka P.*: Technologia wyburzenia metodą strzałową wybranych obiektów kopalnianych. AGH, Kraków 2000 (praca dyplomowa)
- [9] *Krzyworączka P.*: Wstępna analiza wpływu wybranych parametrów wałów przeciwejsmicznych na stopień pochłaniania energii upadku kominów. Międzynarodowa Konferencja nt. Trhacia Technika, Stara Leśna 2002
- [10] *Krzyworączka P., Lewicki J.*: Analiza możliwości wyburzenia metodami strzałowymi komina żelbetowego $H = 170$ m w Elektrowni „Chorzów”, Kraków 2004 (praca niepublikowana)
- [11] *Meltzer R.*: Sprengfaltung von Stahlbetonschornsteinen. Materiały konferencyjne nt. Explosives and blasting technique, A.A. Balkema Publishers, Czechy 2003
- [12] PN-85/B-02170: Ocena szkodliwości drgań przekazywanych przez podłoże na budynki

Zatwierdzono do druku: 17.09.2004 r.