

# Istotne problemy modelowania numerycznego oddziaływania eksploatacji podziemnej na obiekty budowlane

LUCYNA FLORKOWSKA, JAN WALASZCZYK, AGNIESZKA MAJ, JERZY CYGAN

*Instytut Mechaniki Górotworu PAN; ul. Reymonta 27, 30-059 Kraków*

## Streszczenie

Modelowanie matematyczne i numeryczne zagadnień związanych z oddziaływaniem podziemnej eksploatacji górniczej na obiekty budowlane jest, z uwagi na ogromną złożoność zawartych w nim zjawisk i procesów, zadaniem trudnym w realizacji. Zarówno budowa modelu, jak i prowadzenie obliczeń i interpretacja wyników wymagają szerokiej wiedzy oraz dużego doświadczenia.

W pracy przedstawione zostały w sposób syntetyczny najistotniejsze problemy modelowania numerycznego powyższych zagadnień. Omówione zostały zarówno metody poznania, idealizacji jak i pozyskiwania danych niezbędnych do prawidłowego skonstruowania modelu oraz jego walidacji i ewaluacji.

**Słowa kluczowe:** modelowanie numeryczne, szkody górnicze, budynek, podłoże, eksploatacja górnicza, wpływ eksploatacji górniczej na budynki, ochrona terenów górniczych

## 1. Wstęp

Badania naukowe oddziaływania eksploatacji górniczej na powierzchnię terenu oraz obiekty budowlane prowadzone są w kontekście zastosowania ich wyników do zminimalizowania niekorzystnych skutków wybierania złoża. Skutki te mają zarówno wymiar środowiskowy, jak również ekonomiczny i społeczny. Oddziaływanie podziemnej eksploatacji górniczej prowadzi do degradacji powierzchni ziemi, zmian geomorfologii terenu, zaburzeń stosunków wodnych oraz przekształceń lokalnych ekosystemów. Powoduje szkody i zniszczenia infrastruktury technicznej: budynków, dróg i sieci uzbrojenia oraz obniżenie jakości życia mieszkańców.

Poznanie i zrozumienie zjawisk wywoływanych przez podziemną eksploatację kopalin oraz ich wpływu na podłoże i obiekty budowlane jest fundamentalnym zagadnieniem w całym obszarze działań określanych całościowo mianem *ochrony terenów górniczych*. Z tego powodu badania te są niezwykle istotne. Prawidłowość ich prowadzenia, dobór odpowiednich metod, procedur i narzędzi badawczych warunkuje wiarygodność wyników, które stanowią przecież podstawę wszelkich działań profilaktycznych, zarówno w zakresie profilaktyki górniczej (odpowiedniego prowadzenia eksploatacji) jak i profilaktyki budowlanej (odpowiedniego zabezpieczenia obiektów).

Jednym z narzędzi poznania, wymienianym przez nowoczesną filozofię nauki obok doświadczenia (obserwacji) i idealizacji (wyboru istotnych właściwości rzeczy), jest **modelowanie matematyczne**. Współczesna nauka formułując problem poszukuje jego rozwiązania wykorzystując w tym celu cały aparat, jakim dysponuje matematyka – najpotężniejsze i najbardziej obiektywne narzędzie poznania, jakie posiadamy. Podejście to jest stosowane zwłaszcza w naukach technicznych, w których wykorzystywane są badania prowadzone na modelach matematycznych. Następnym etapem tego typu badań jest ich walidacja i ewaluacja na modelach materialnych oraz obiektach rzeczywistych. Modelowanie matematyczne pozwala optymalizować koszty badań ale także prowadzić analizy procesów na poziomie niedostępnym dla bezpośredniej obserwacji. Istnieje wiele obszarów nauki, dla których badanie modelu matematycznego, weryfikowanego tylko dla kolejnych szczególnych przypadków, jest jedyną drogą obserwacji i próby zrozumienia rzeczywistości.

Oddziaływanie podziemnej eksploatacji górniczej na obiekty budowlane jest jednym z tych zagadnień, w których badanie modelu matematycznego stanowi jedyną metodę umożliwiającą prowadzenie analizy uwzględniającej wszystkie najistotniejsze czynniki wpływające na rozwiązanie. Opracowanie prawidłowego modelu matematycznego oraz jego kalibracja i weryfikacja jest jednakże zadaniem złożonym i trudnym. Najważniejsze aspekty i problemy tego zagadnienia omówione zostaną w niniejszym artykule.

## 2. Sformułowanie zagadnienia

Pierwszym etapem analizy jest sformułowanie problemu naukowego (lub inżynierskiego), którego rozwiązanie będzie poszukiwane. W zagadnieniach oddziaływania eksploatacji na obiekty budowlane poszukiwane są najczęściej odpowiedzi na pytania:

- Czy budynek jest w stanie bezpiecznie przenieść oddziaływanie projektowanej eksploatacji?
- Czy określony sposób zabezpieczenia jest optymalny w konkretnej sytuacji?
- Czy zaobserwowane deformacje (uszkodzenia) obiektu są wynikiem oddziaływania eksploatacji górniczej?

Podstawą do udzielenia odpowiedzi jest znajomość pól naprężeń, odkształceń i przemieszczeń, powstałych w konstrukcji budynku. Wielkościami poszukiwanymi są zatem wymienione powyżej pola. Wyznaczone wielkości i rozkłady naprężeń w przekrojach elementów konstrukcyjnych pozwalają na obliczenie występujących w nich sił wewnętrznych i odpowiednie zaprojektowanie tych elementów, a w przypadku obiektów istniejących – skontrolowanie stanów granicznych. Przyjęcie odpowiednich kryteriów pozwala ponadto na ocenę wyłączenia konstrukcji.

Analiza oparta na symulacji numerycznej całego procesu oddziaływania eksploatacji stanowi także narzędzie rozważań naukowych, pozwalając na obserwowanie zachowania się obiektu, jako całości oraz poszczególnych jego elementów w odpowiedzi na różnego typu sytuacje górnicze. Możliwe jest m.in. porównanie skutków eksploatacji prowadzonej z różną prędkością lub przy różnych sposobach likwidacji zróbów, co może mieć znaczenie dla ochrony istniejącej zabudowy, w szczególności zaś dla obiektów bytkowych (Florkowska, 2010 B).

## 4. Obserwacja

Podstawą opracowania prawidłowego modelu jest solidna wiedza o modelowanych obiektach. Źródłem tej wiedzy są głównie wyniki obserwacji (pomiarów). W badaniach naukowych obejmujących oddziaływanie eksploatacji górniczej na budowlę przedmiot obserwacji stanowią zarówno obiekty materialne jak również procesy i zjawiska. Do pierwszej grupy należą: obiekt budowlany wraz z podłożem oraz istniejącymi zabezpieczeniami. W drugiej grupie znajdują się procesy deformacyjne zachodzące zarówno w podłożu jak i w budowlu oraz procesy zachodzące na kontakcie grunt – fundament i odpowiadające na przekazywanie oddziaływań pomiędzy obiektem budowlanym a podłożem.

Prowadzenie obserwacji dokonuje się zarówno za pomocą urządzeń pomiarowych i przyrządów, jak i zmysłów, przy czym każda z wymienionych metod ma istotne znaczenie. Systemy pomiarowe instalowane zarówno na konstrukcji jak i w podłożu pozwalają na prowadzenie ciągłych obserwacji przebiegu procesu deformacji i umożliwiają bieżące monitorowanie stanu obiektu. Istotną ich wadą jest jednak punktowy charakter tego rodzaju obserwacji. Oznacza to, że wyniki tak prowadzonych obserwacji nie dają obrazu zachowania się całości badanego układu. Część obiektu pozostająca poza obszarem pomiarowym czujników jest dla tego rodzaju systemu „niewidoczna”. Dlatego zastosowanie tego typu systemów do zapewnienia bezpieczeństwa obiektu wymaga połączenia ze stałym nadzorem technicznym, polegający na systematycznym sprawdzaniu obiektu przez osoby dysponujące odpowiednią wiedzą i doświadczeniem. Zainstalowanie automatycznego systemu pomiaru, rejestracji i zdalnej transmisji danych posiada jednakże szereg niezwykle istotnych zalet. Zapewnia on m.in.:

- ciągłą obserwację reakcji obiektu na trwającą eksploatację,
- rejestrację zjawisk nagłych,
- pełny zapis i archiwizację danych.

Zależnie od potrzeb systemy pomiarowe dysponują różnymi typami czujników, dzięki którym istnieje możliwość pomiaru:

- odkształceń,
- zmian rozwarłośc szczelin,
- nachyleń i obrotów.

Dane pomiarowe dostarczone przez system stanowią źródło wiedzy na temat zachowania się obserwowanego obiektu i podstawę analiz dotyczących stanu wytrzymałości poszczególnych elementów, ewentualnie całej konstrukcji. Są to podstawowe informacje dla oceny bezpieczeństwa budowli i w razie potrzeby podjęcia decyzji o zastosowaniu koniecznych, optymalnych środków profilaktyki budowlanej lub górniczej.

## 5. Idealizacja

Opracowanie modelu wiąże się z wyodrębnieniem tych procesów i zjawisk, które mają istotne znaczenie dla rozważanego zagadnienia. Przeprowadzona zostaje zatem idealizacja, polegająca na wskazaniu cech istotnych oraz tych, które mogą zostać zaniedbane.

W przypadku modelowania oddziaływania podziemnej eksploatacji górniczej na budynek czynnikami, które w sposób najistotniejszy determinować będą rozwiązanie są: sytuacja i historia górnicza oraz budowa geologiczna – w odniesieniu do podłoża; geometria bryły, rodzaj konstrukcji i posadowienia oraz wiek i stan techniczny – w odniesieniu do budynku. Zatem model matematyczny, który stanowić ma podstawę analizy powinien umożliwiać uwzględnienie wymienionych cech zagadnienia. Jednocześnie znaczącą kwestią pozostaje, aby przyjęty opis matematyczny pozwalał na wiarygodne określenie niezbędnych parametrów. Model, który precyzyjnie opisuje zachowanie się obiektu staje się bezużyteczny w sytuacji, gdy nie istnieją praktyczne możliwości przeprowadzenia badań koniecznych do jego właściwego skalibrowania.

## 6. Opracowanie modelu

Niezbędnym warunkiem prawidłowego przeprowadzenia analizy jest rozpoznanie sytuacji geologicznej – górniczej, ocena warunków konstrukcyjnych, identyfikacja więzów kinematycznych i warunków obciążeniowych oraz wyłonienie wszelkich czynników, które mogą w sposób istotny wpływać na stan układu podłoża – budynek. Rozpoznanie to prowadzone jest na podstawie dostępnej dokumentacji technicznej obiektu, obmiarów i wizji lokalnych, danych na temat sytuacji i historii górniczej oraz informacji dotyczących podłoża. Należy wykonać możliwie szeroką kwerendę dostępnych dokumentów, projektów, ekspertyz oraz dokumentacji pomiarowej z danego obszaru i przeprowadzić analizę uzyskanych informacji. W przypadku obiektów istniejących, zwłaszcza budynków starych, częstym problemem jest brak dokumentacji technicznej budynku lub jej niekompletność. Jeżeli nie udaje się odtworzyć brakującej dokumentacji nierzadko jedynym wyjściem pozostaje inwentaryzacja (która w przypadku budynków zamieszkałych jest dość kłopotliwa).

Drugą grupę danych stanowi materiał uzyskany na drodze badań i pomiarów. Ważną rolę odgrywają wyniki pomiarów deformacji powierzchni oraz budynków. Najczęściej są to wyniki pomiarów geodezyjnych, prowadzonych przez zespoły miernicze zakładu górniczego. Zbiory cyklicznych pomiarów, realizowanych przez te służby, stanowią ważne źródło informacji o zachowaniu się górotworu w danym rejonie, a skorelowane z mapami pokładowymi mogą stanowić podstawę wyznaczenia realnych wskaźników deformacji na badanym obszarze. W przypadku analiz dotyczących budynków, wyniki te są jednak często mało przydatne, z uwagi na zbyt małą częstotliwość pomiarów.

Dane na temat właściwości mechanicznych materiałów, zarówno geologicznych, tworzących podłoża, jak i budowlanych, najlepiej ustalić na podstawie badań laboratoryjnych lub *in situ*. W przypadku budynku projektowanego można wykorzystać informacje na temat właściwości materiałowych zawarte w dokumentacji technicznej. W przypadku prowadzenia analizy dla obiektu historycznego, w którym mamy do czynienia z materiałem zdegradowanym, zmienionym przez długoletnie oddziaływanie różnego typu czynników środowiskowych, wskazane jest pobranie próbek i wykonanie badań laboratoryjnych. Niestety, bardzo często nie ma możliwości pobrania próbek o takich rozmiarach i w takiej liczbie, która pozwoliłaby na określenie parametrów dla zaawansowanego modelu materiałowego, np. zabytkowego muru. W takich przypadkach pozostaje przyjęcie prostego prawa fizycznego i szacowanie właściwości materiałowych na podstawie badań małych próbek oraz aproksymacji wyników z zastosowaniem modelowania matematycznego.

Najważniejsze zbiory danych wejściowych do analizy stanowią (Florkowska, 2010 B):

**1. Rozpoznanie geologiczne i geotechniczne**, które jest podstawą do określenia:

- naprężeniowych warunków początkowych modelu, odzwierciedlających pierwotny stan panujący w podłożu,
- warunków kontaktowych pomiędzy gruntem i fundamentem,
- geometrii modelu podłoża.

Rozpoznanie to wykonywane jest w oparciu o kwerendę istniejącej dokumentacji geologicznej obszaru oraz o wykonanie szczegółowych badań geologicznych w pobliżu rozważanego obiektu. Studia dokumentacji i literatury geologicznej dają pogląd na budowę i morfologię terenu oraz wskazują miejsca występowania struktur geologicznych mogących stanowić potencjalne zagrożenie (np. uskoków) (Florkowska, 2010 A). Odwierty wykonywane w otoczeniu obiektu służą rozpoznaniu budowy podłoża oraz pobraniu próbek do badań laboratoryjnych w celu określenia praw materiałowych poszczególnych warstw i wyznaczenia ich parametrów.

**2. Rozpoznanie sytuacji konstrukcyjnej i stanu technicznego budynku** prowadzone jest z wykorzystaniem istniejącej dokumentacji technicznej oraz obmiarów i wizji lokalnych obiektu. Na tej podstawie pozyskiwane są informacje dotyczące: geometrii bryły i poszczególnych elementów, ustroju nośnego, typów połączeń, materiałów oraz działających na konstrukcję obciążeń (Mokrosz, 2006). W ocenie stanu technicznego pomocne mogą być ponadto oceny odporności budynków na oddziaływania górnicze prowadzone zwykle według metody punktowej na etapie projektowania eksploatacji. Szczególnie istotne jest rozpoznanie sposobu i głębokości posadowienia oraz rodzaju i stanu technicznego fundamentów. Stanowią one podstawę określenia warunków kontaktowych pomiędzy budowlą a podłożem. Przyjmując, że oddziaływania na kierunku stycznym do powierzchni kontaktu przekazywane są poprzez tarcie, ustalić należy wartość współczynnika tarcia pomiędzy fundamentem a gruntem. Zależy on zarówno od rodzaju gruntu, jak i rodzaju powierzchni fundamentu. Jeżeli istnieje taka możliwość, należy pobrać próbki materiałów do badań laboratoryjnych.

**3. Szczególnie ważnym aspektem analizy jest ocena sytuacji górniczej**, zarówno w odniesieniu do historii, jak i do planowanych eksploatacji. Z dokumentacji planów eksploatacji pozyskiwane są m.in. informacje na temat wielkości, kierunku i prędkości przyszłych oddziaływań, które stanowią następnie podstawę sformułowania kinematycznych warunków brzegowych. Jeżeli analiza dotyczy oceny oddziaływania trwającej lub zakończonej eksploatacji, to warunki te formułowane są na podstawie geodezyjnych pomiarów deformacji powierzchni terenu.

Analiza górniczej przeszłości górotworu jest niezwykle istotna w ocenie stanu podłoża obiektu oraz prawdopodobieństwa wystąpienia szczególnie niekorzystnych skutków eksploatacji. W ekstremalnych warunkach wystąpić mogą znacznie większe wartości deformacji podłoża, spowodowane trwałym i nieodwracalnym naruszeniem struktury górotworu, lub deformacje nieciągłe, wywołane aktywacją starych zrobów czy niekorzystnym nałożeniem się skutków eksploatacji kilku pól. Na terenach, gdzie eksploatacja górnicza prowadzona jest od wielu lat pominięcie w analizie historii górniczej terenu jest niedopuszczalnym błędem.

**4. Badania laboratoryjne** mają na celu poznanie mechanizmów zachowania się materiałów w zadanych warunkach obciążeniowych. Na jakość tej oceny mają istotny wpływ zarówno sposób pobierania, wielkość i liczba próbek jak i zakres i rodzaj badań. Należy pamiętać, że, zwłaszcza w przypadku gruntów słabych, nieumiejętne pobieranie prób powoduje zniszczenie struktury ośrodka, w wyniku czego uzyskane z eksperymentów laboratoryjnych wyniki mogą nie odzwierciedlać rzeczywistego zachowania ośrodka. Pozbawione tego ryzyka są metody badań odkształcalności *in situ*. Metody te stosowane są jednak rzadko, z uwagi na znaczne koszty oraz trudności techniczne w wykonaniu na terenach zabudowanych.

Na podstawie wyników badań dokonywany jest wybór prawa konstytutywnego opisującego zachowanie się materiałów oraz wyznaczenie jego parametrów.

**5. Pomiary deformacji powierzchni** powstających wskutek wybierania złoża są podstawą określenia kinematycznych warunków brzegowych zagadnienia. Deformacje powierzchni wywołane eksploatacją monitorowane są na bieżąco przez służby miernicze zakładu górniczego. Wykonują one pomiary geodezyjne przemieszczeń prowadzone na liniach pomiarowych lub punktach rozproszonych (Popiołek 2009). Dokumentacja tych pomiarów jest także źródłem informacji na temat historii górniczej

terenu oraz reakcji górotworu na wybieranie złoża. Materiały te wykorzystane są do oceny stanu degradacji górotworu, prognozowania reakcji terenu na projektowaną eksploatację a także do analizy oddziaływania zakończonej eksploatacji na obiekt budowlany.

6. **Pomiary deformacji obiektu** dokonywane są metodami geodezyjnymi bądź przy zastosowaniu sensorów odkształceń (tensometrycznych lub potencjometrycznych) i czujników inklinometrycznych (Florkowska i Kanciruk, 2013). Zainstalowanie systemu pomiarowego na obiekcie narażonym na oddziaływanie eksploatacji górniczej pełni funkcję bieżącego **monitorowania stanu budowli** wspomagającego ochronę bezpieczeństwa konstrukcji. Wyniki pomiarów umożliwiają walidację modelowania i ocenę uzyskanych wyników obliczeń. Stanowią też cenny pod względem naukowym zapis reakcji obiektu na prowadzenie eksploatacji.

Opisane powyżej zagadnienia stanowią kluczowe aspekty prawidłowej realizacji procesu modelowania numerycznego zagadnień związanych z oddziaływaniem eksploatacji górniczej na obiekty budowlane (Florkowska, 2010 A). Szczególnie istotnym elementem jest natomiast niewątpliwie umiejętność odpowiedniej interpretacji uzyskanych wyników obliczeń i pomiarów. Rozwiązanie zadania matematycznego daje w rezultacie obraz stanu naprężeń, odkształceń i przemieszczeń całego układu budynek – podłoże w dowolnej chwili trwania eksploatacji. Uzyskane wyniki powinny zostać poddane rzetelnej weryfikacji w oparciu o wiedzę i doświadczenie prowadzącego analizę oraz wyniki obserwacji i pomiarów deformacji podłoża i konstrukcji.

## 7. Podsumowanie

W problemach związanych z oceną oddziaływania podziemnej eksploatacji górniczej na obiekty budowlane modelowanie numeryczne jest praktycznie jedyną metodą, która umożliwia prowadzenie analizy z uwzględnieniem wszystkich czynników w sposób istotny wpływających na rozwiązanie. Nie ulega jednak wątpliwości, że opracowanie prawidłowego modelu tego złożonego zagadnienia jest zadaniem bardzo trudnym, a weryfikacja oparta o wyniki pomiarów stanowi niezbędny element rzetelnej analizy.

Praca przedstawia syntetyczny zbiór wytycznych i wskazówek dotyczących opracowywania modelu matematycznego stanowiącego bazę analiz numerycznych. Autorzy, wychodząc od przedstawienia najistotniejszych cech współpracującego układu budowla – deformujące się podłoże górnicze, formułują uwagi dotyczące najpierw obserwacji (stanowiącej źródło wiedzy o procesach i zjawiskach wchodzących w skład zagadnienia) a następnie idealizacji (jako procesu wyboru istotnych cech wpływających na rozwiązanie). Główną część pracy stanowi zestaw zaleceń dotyczących prawidłowego prowadzenia procesu modelowania opartego o gruntowne rozpoznanie stanu rzeczywistego i zgromadzenia kompletnego zbioru informacji dotyczących najistotniejszych cech układu.

Artykuł stanowi krótkie kompendium zawierające zbiór podstawowych informacji dotyczących modelowania numerycznego wpływu eksploatacji górniczej na obiekty budowlane.

Praca została wykonana w roku 2013 w ramach prac statutowych realizowanych w IMG PAN w Krakowie, finansowanych przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

## Literatura

- Florkowska L., 2010 A: *Land subsidence due to Mining Operations in Disturbed Rock Mass, on the Example of Ruda Śląska (Poland)*. Arch. Min. Sci., Vol. 55, No 3, p. 691-701.
- Florkowska L., (2010 B): *Zastosowanie mechaniki nieliniowej w zagadnieniach ochrony budynków na terenach górniczych*. Arch. Min. Sci., Monografia, Nr 11.
- Florkowska L., Kanciruk A., 2013: *Analysis of the consequences of mining exploitation in substantially disturbed strata based on spatial measurements of a building's tilt*. Rock Mechanics for Resources, EUROCK 2013. CRC Press. p. 575-580
- Mokrosz R., 2006: *Obciążenia obiektów budowlanych wynikające z oddziaływań górniczych*. Prace Naukowe GIG. Górnictwo i Środowisko. Bezpieczeństwo obiektów budowlanych na terenach górniczych – szkody górnicze. Katowice.
- Popiołek E.: *Ochrona terenów górniczych*. Uczelniane Wydawnictwo Naukowo-Dydaktyczne – AGH. Kraków, 2009

## **Significant problems the numerical modelling of the impact of underground mining exploitation on buildings**

### **Abstract**

Numerical modelling has become an important tool allowing the impacts of mining exploitation on the existing and designed engineering structures to be thoroughly investigated. The interactions between engineering structures and subsiding grounds is are most complex phenomena and in some cases numerical simulation is the only available research method allowing the co-occurrence of a multitude of factors to be taken into account. Because of the complexity of this issue, the development of a full mathematical model is a difficult task, requiring the knowledge of the geological and mining conditions in the area as well as the constructional parameters of the engineering structure being erected.

This paper addresses the major issues involved in development of a mathematical model of the engineering structure-ground system. These problems are summarised on the basis of the authors' extensive experience in the field of monitoring of rock strata subsidence and structural deformation and in mathematical modelling and numerical simulations. Basing on the examples of buildings subjected to the impacts of mining exploitation, the authors identify the major determinants of the type and extent of structural damage and the key elements for model development.

**Keywords:** numerical modelling, mining damage, building, subsoil, mining exploitation, impact of mining on buildings, protection of mining area