BIULETYN PAŃSTWOWEGO INSTYTUTU GEOLOGICZNEGO 431: 287–296, 2008 R.

PORÓWNANIE METOD PROGNOZOWANIA ZATAPIANIA KOPALŃ WĘGLA KAMIENNEGO

COMPARISON OF METHODS FOR PREDICTION OF FLOODING PROCESSES IN HARD COAL MINES

ROBERT ZDECHLIK[1], ANDRZEJ HAŁADUS[1], PRZEMYSŁAW BUKOWSKI[2]

Abstrakt. W artykule porównano rezultaty obliczeń prognostycznych przebiegu zatapiania kopalni węgla kamiennego, wykonanych dwiema metodami: analityczną i z wykorzystaniem modelu matematycznego. Obliczenia analityczne oparto na szczegółowej ocenie pojemności wodnej górotworu, zrobów i wyrobisk korytarzowych oraz wielkości dopływów. Numeryczne badania modelowe, uważane za najnowocześniejsze narzędzie predykcji hydrogeologicznej, są rzadko wykonywane na potrzeby górnictwa węgla kamiennego. Głównym powodem są trudności związane z odwzorowaniem skomplikowanych warunków hydrogeologicznych, dodatkowo zaburzonych złożonymi czynnikami antropogenicznymi. Jako poligon doświadczalny do badań wybrano przeznaczony do całkowitej likwidacji ruch jednej z kopalń prowadzących eksploatację we wschodniej części Górnośląskiego Zagłębia Węglowego, w obrębie krakowskiej serii piaskowcowej. Ruch ten stanowi odrębną jednostkę wydobywczą, odizolowaną hydraulicznie od reszty kopalni. Trwający od dłuższego czasu proces fizycznej likwidacji tej części kopalni umożliwił przeprowadzenie tzw. analizy *post-audit,* polegającej na zweryfikowaniu wcześniejszych prognoz przez porównanie ich wyników z faktycznym przebiegiem zatapiania.

Słowa kluczowe: odwadnianie kopalń, modelowanie, filtracja nieustalona.

Abstract. This article presents the prognoses of partial flooding of mine workings in hard coal mine. The prognoses in time were prepared on the basis of analytical and mathematical methods. Analytical calculations were made based on storage capacity and water inflow data. A mathematical model of hydrogeological conditions, consisting of nine layers, was verified in steady-state and transient conditions. The model shows that water inflow to mine workings and groundwater table is perfectly in line with the real measurements.

Key words: mine dewatering, groundwater modelling, transient filtration.

WSTĘP

Transformacje górnictwa węgla kamiennego w Polsce w ostatnich kilkunastu latach na ogół były związane z zaniechaniem eksploatacji w części zakładów, głównie na skutek wyczerpania zasobów bądź nieopłacalności ich dalszej eksploatacji. Jednakże zaprzestanie eksploatacji kopaliny nie rozwiązuje problemu odwadniania zakładu górniczego. Z uwagi na możliwość powstania zagrożenia wodnego dla czynnej kopalni, w większości przypadków odwadnianie musi być prowadzone nadal. W sytuacji gdy likwidowana kopalnia nie ma żadnych połączeń hydraulicznych z kopalniami sąsiednimi, możliwe jest jej całkowite zatopienie. Natomiast częściowe zatopienie kopalni jest możliwe, gdy kontakty hydrauliczne występują na wyższych poziomach. Z uwagi na skomplikowaną budowę geologiczną górotworu naruszonego eks-

[1] Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków

[2] Główny Instytut Górnictwa, Zakład Geologii i Geofizyki, Plac Gwarków 1, 40-166 Katowice

ploatacją górniczą, istotnego znaczenia nabiera prognoza przebiegu procesu zatapiania wyrobisk górniczych i górotworu, uwzględniająca przyszłe zmiany stosunków wodnych.

Prognozowanie przebiegu procesu zatapiania kopalni węgla kamiennego wykonano metodą analityczną i przy wykorzystaniu modelu cyfrowego. Prognozę wykonano dla likwidowanego ruchu jednej z kopalń położonych we wschodniej części Górnośląskiego Zagłębia Węglowego (GZW).

CHARAKTERYSTYKA TERENU BADAŃ

Obszar górniczy Zakładu Górniczego, o powierzchni około 62 km^2, położony jest we wschodniej części GZW (wschodnia część południowego skrzydła niecki głównej), na lokalnym wyniesieniu karbonu w rejonie Libiąża. Dawny Ruch II kopalni, z uwagi na przeważnie naturalny (tektoniczny) charakter granic izolujących go od kopalń sąsiednich, stanowił praktycznie samodzielną jednostkę wydobywczą. Jest on zlokalizowany w północno-zachodniej części obszaru górniczego (fig. 1).

W rejonie kopalni można wyróżnić cztery piętra wodonośne: czwartorzędowe, neogeńskie, triasowe i karbońskie (Haładus i in., 2006). Czwartorzędowe piętro wodonośne tworzą utwory piaszczyste, o miąższości na ogół nie przekraczającej 10 m. Piętro to zasilane jest poprzez infiltrację wód opadowych i częściowo wód powierzchniowych. Piętro wodonośne neogenu tworzą cienkie wkładki piasków, występujące w obrębie kompleksu iłów o miąższości dochodzącej do 160 m. Słabo zawodnione osady budujące triasowe piętro wodonośne, głównie wapienie i dolomity, występują fragmentarycznie, tworząc lokalne wyniesienia morfologiczne na utworach karbonu. Karbońskie piętro wodonośne związane jest z piaskowcami i zlepieńcami krakowskiej serii piaskowcowej (warstw libiąskich i łaziskich), o współczynnikach filtracji od $1{,}0\cdot10^{-8}$ do $2{,}0\cdot10^{-6}$ m/s i współczynnikach odsączalności grawitacyjnej od 0,007 do 0,07. Udział iłowców i mułowców w kompleksie na ogół nie przekracza 10%. Zasilanie następuje poprzez infiltrację z zawodnionych utworów czwartorzędu (w miejscach, gdzie brak jest izolujących osadów neogenu) oraz z występujących lokalnie zawodnionych osadów triasu. Zwierciadło wody nawiercone przed rozpoczęciem robót górniczych w rejonie Ruchu II w piaskowcach karbońskich na głębokości około 130 m (120 m n.p.m.), stabilizowało się na głębokości około 20 m (230 m n.p.m.). Eksploatacja górnicza w trzech pokładach węgla kamiennego wymusiła intensywny drenaż piętra karbońskiego (również triasowego), trwający nieprzerwanie blisko 30 lat, co spowodowało powstanie leja depresji o powierzchni kilkudziesięciu kilometrów kwadratowych i maksymalnym obniżeniu dochodzącym do 300 m.

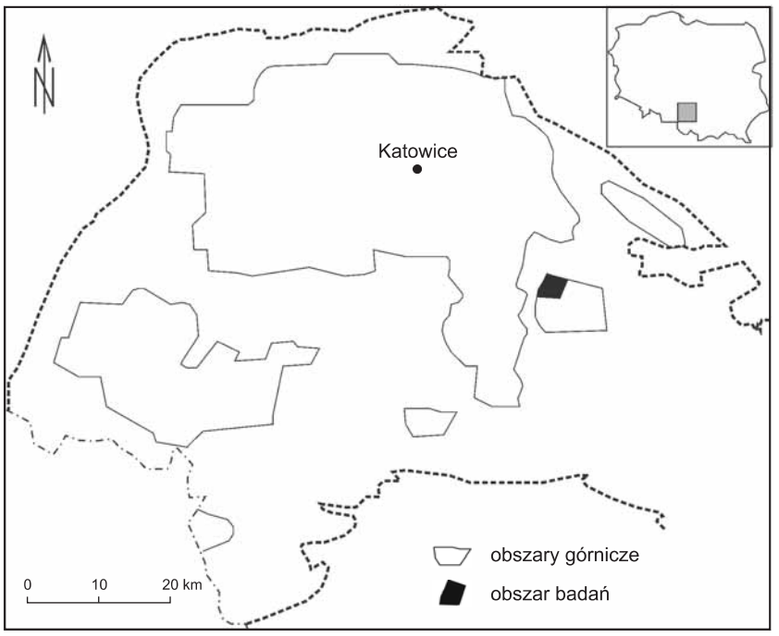

Fig. 1. Położenie obszaru badań w granicach Górnośląskiego Zagłębia Węglowego

Location of the investigated area within the Upper Silesian Coal Basin borders

Ruch II kopalni w latach siedemdziesiątych i osiemdziesiątych XX w. udostępniono dwoma upadowymi (wentylacyjną i wydobywczą) oraz szybem. Eksploatację w pokładach 116/2, 117 i 118, w przedziale rzędnych od 100 do –74 m n.p.m. (głęb. 160–325 m) prowadzono systemem ścianowym z likwidacją wyeksploatowanych przestrzeni poprzez zawał skał stropowych. Wyrobiska górnicze Ruchu II nie miały bezpośredniego połączenia z wyrobiskami zakładów sąsiednich.

W początkowym okresie eksploatacji (przed 1979 r.) dopływy do wyrobisk Ruchu II wynosiły około 5,5 m^3/min i w latach 1985–1989 wzrosły do około 11,0–11,3 m^3/min. Począwszy od 1990 r. wykazywały tendencję malejącą, osiagajac w końcowej fazie eksploatacji (2003 r.) około 8 m^3/min. W 2003 r. wody słodkie wykorzystywane do celów pitno-bytowych, dopływające głównie do pokładu 116/2, przekierowano otworami spływowymi do pokładu 118, skąd całość wód odprowadzano na powierzchnię, utrzymując rzędną odwadniania –64 m n.p.m. Po zatrzymaniu pomp odwadniania polowego (22.11.2003) woda zaczęła wypełniać zroby pokładu 118 i górotwór do rzędnej około –24 m n.p.m. (12.03.2004). Po osiągnięciu tej rzędnej uruchomiono odwadnianie polowe i skierowano całość wody do odwadniania głównego. Poziom taki utrzymywano do czasu zakończenia prac likwidacyjnych. 30 maja 2005 r. całkowicie zaprzestano odwadniania wyrobisk Ruchu II, rozpoczynając proces zatapiania wyrobisk i górotworu. Szyb, upadowe z powierzchni i część wyrobisk górniczych pozostały niezlikwidowane, co w przyszłości może umożliwić ich ewentualne wykorzystanie, a obecnie pozwala na prowadzenie w szybie obserwacji odbudowy zwierciadła wody.

PROGNOZA PRZEBIEGU ZATAPIANIA KOPALNI – METODA ANALITYCZNA

METODYKA OBLICZEŃ

Prognozy przebiegu zatapiania kopalni wykonywane metodami analitycznymi wymagają precyzyjnego określenia wielkości pojemności wodnej wolnych przestrzeni V_{ci} [m^3] oraz przewidywanych dopływów w trakcie zatapiania Q_i [m^3/d]. Określenie na ich podstawie prognozowanego czasu t_i [d] i przebiegu procesu zatapiania dla poszczególnych zakresów głębokości (założonych przedziałów obliczeniowych, np. co 25, 50 lub 100 m), wykonywane jest zgodnie ze wzorem:

$$t_i = \frac{V_{ci}}{Q_i} \qquad [1]$$

Natomiast całkowity czas t [d] zatapiania kopalni do docelowej rzędnej określa się jako sumę narastającą czasów zatapiania w poszczególnych przedziałach, począwszy od przedziału najniższego:

$$t = \sum_{i=1}^{n} t_i \qquad [2]$$

Całkowita pojemność wodna V_c zatapianej kopalni jest sumą pojemności wolnych przestrzeni (ΣV_{ci}), określonych we wszystkich przedziałach obliczeniowych dla kilku składowych pojemności wodnych. Pojemności wodne zwykle oblicza się dla: zrobów (V_z), wyrobisk korytarzowych (V_k) i górotworu (V_g). Ponadto dodatkowo oblicza się pojemność wodną szczelin poeksploatacyjnych (V^c_{sz}) (Rogoż, 1974, 2004) oraz tzw. pojemność wodną dodatkową (V_d), która wraz z pojemnością wodną górotworu (V_g) została zdefiniowana przez Bukowskiego (2002) jako chłonność wodna górotworu ($V_{ch} = V_g + V_d$):

$$V_c = Vz + Vk + V^c sz + Vch \text{ (lub } V_g) \qquad [3]$$

Metodyka wyznaczania poszczególnych składowych pojemnościowych była wielokrotnie publikowana w pracach Rogoża (1974, 2004) oraz Bukowskiego (1999a, b, 2002, 2004) i nadal jest doskonalona. Problemy w dokładności oszacowania składowych pojemności metodą analityczną głównie związane są z metodyką wyznaczania poszczególnych parametrów hydrogeologicznych, które służą do ich obliczenia. W tak skomplikowanych warunkach, jakie panują w poruszonym eksploatacją górotworze, wynik oszacowań uzyskanych różnymi metodami dla niektórych parametrów może się różnić od kilkudziesięciu do nawet kilkuset procent. Przykładem mogą być rozbieżności w ustalaniu wartości pojemności wodnej górotworu opartej na współczynniku odsączalności (μ) lub wskaźniku odsączenia skał (J_o). Różnice wartości współczynnika odsączalności skał zwięzłych, uzyskane np. metodami: odwirowania (Motyka i in., 1971), termiczną (Messer, 1951), drenażu kapilarnego (Bromek, 1972, 1977) lub nasycania kapilarnego (Bukowski, 1999a, 2007a), mogą sięgać kilkudziesięciu i więcej procent. Stąd w metodzie analitycznej sprawą najważniejszą, a jednocześnie najtrudniejszą, jest właściwy dobór parametrów do szacowania poszczególnych składowych pojemnościowych zbiornika. Wymaga to niejednokrotnie ogromnego nakładu pracy i dużego doświadczenia autora prognozy w przyjmowaniu właściwych wartości poszczególnych składników obliczeń (Bukowski i in., 2006).

Pojemność wodną górotworu (V_g) w założonych przedziałach głębokości przyjęto jako wartość przybliżoną, określoną iloczynem powierzchni zrobów, udziału utworów chłonnych (piaskowców i zlepieńców) w danym zakresie głębokości, przewidywanej wysokości zwierciadła wody i uśrednio-

nego współczynnika odsączalności (lub sporadycznie wskaźnika odsączenia), zgodnie z relacją (Rogoż i in., 1995):

$$V_g = \left(p \cdot F_o \cdot \Delta z \cdot \mu\right) \cdot 1{,}15 \qquad [4]$$

gdzie:

P – udział piaskowców w złożu (0,8–1,0, przyjęto 0,9), [–],
F_o – powierzchnia poziomego zasięgu odwadniania (odpowiadająca zasięgowi zrobów), [m^2],
Δz – miąższość górotworu w obrębie rozpatrywanego interwału głębokości, [m],
μ – współczynnik odsączalności lub wskaźnik odsączenia skał wodochłonnych, [–]; dla zasięgu powtórnego nawodnienia skał F_o w procesie wypełniania leja depresji wodą przyjmowana była poprawka w wysokości 15%.

Schematyzację (geometryczną) obliczeń pojemności wodnej górotworu przyjęto za Bukowskim (1999a, b). Według tego schematu w obliczeniach uwzględniany jest górotwór położony nie tylko powyżej wyrobisk w określonym przedziale obliczeniowym, lecz także górotwór ponad pozostałymi, uprzednio częściowo zatopionymi przedziałami obliczeniowymi (nad istniejącymi zbiornikami wodnymi), których przybywa w miarę planowanego postępu zatapiania.

Istotną składową obliczeń analitycznych stanowi pojemność wodna zrobów, która w rozpatrywanym poligonie odnosi się do zrobów zawałowych (V_z). W poszczególnych pokładach węgla obliczano ją, przyjmując wartości współczynnika pojemności wodnej zrobów (c) wg Rogoża (1974, 2004):

$$V_z = \frac{c \cdot F_p \cdot M}{\cos \alpha}, \quad c = 0{,}485e^{-0{,}00205H} \qquad [5]$$

gdzie:

F_p – powierzchnia wyeksploatowanego pokładu w rozpatrywanym interwale głębokości, [m^2],
M – grubość wybranego pokładu, [m],
α – kąt nachylenia pokładu, [°],
c – współczynnik pojemności wodnej zrobów szacowany z uwzględnieniem głębokości zalegania wybranego pokładu węgla (H).

Dla badanego poligonu współczynnik c przyjmuje wartości z przedziału od 0,26 do 0,37. W analitycznej metodzie prognostycznej jego wartość obliczano dla każdego przyjętego interwału głębokości. Natomiast w modelu numerycznym przyjęto średnią arytmetyczną ze skrajnych wartości (0,315).

Pojemność wodna wyrobisk korytarzowych (także szybów) limitowana jest wymiarami geometrycznymi wyrobisk, głównie powierzchnią przekroju poprzecznego i długością tych wyrobisk, z uwzględnieniem stopnia ich zaciśnięcia, a w przypadku wyrobisk zlikwidowanych (w tym szybów) – porowatością materiału skalnego użytego do ich likwidacji. Przyjęto następujące wartości współczynnika pojemności wodnej wyrobisk korytarzowych: 0,95 – dla wyrobisk kapitalnych, niewyrabowanych, o przekroju 18 m^2; 0,7 – dla wyrobisk korytarzowych o przekroju 14 m^2 i 1,0 – dla szybu zlokalizowanego w zatapianej partii.

Pojemność wodną szczelin i rozwarstwień poeksploatacyjnych w górotworze określa się szacunkowo przez porównanie pojemności wodnej zrobów (z wykorzystaniem współczynnika c) i objętości niecki obniżeniowej na powierzchni.

Dla określenia wielkości dopływów do wyrobisk górniczych, aby ocenić przebieg procesu zatapiania kopalni, przyjęto następujące założenia (Rogoż, 2004):

– w miarę postępu zatapiania następuje podnoszenie zwierciadła wody w wyrobiskach górniczych i górotworze;

Tabela 1

Pojemności wodne i prognozowany czas zatapiania wodami kopalnianymi – metoda analityczna

Storage capacity and predicted time of flooding with mine water – analytical method

Zakres rzędnych	Pojemność wodna				Dopływy	Czas zatapiania	Czas zatapiania narastająco
	zrobów	wyrobisk korytarzowych	górotworu	całkowita			
	V_z	V_k	V_g	V_c	Q	t	Σt
[m n.p.m.]	[m^3]				[m^3/d]	[d]	
25 – 50	991600	353200	806200	2151000	7120	302	801
12,5 – 25	286100	71200	354800	712100	7905	90	499
0 – 12,5	253700	63100	314600	631400	8444	75	409
(–24) – 0	1020900	418600	534700	1974200	9214	214	334
(–50) – (24)	517200	94000	225600	836800	9952	84	120
(–74) – (–50)	271500	85100	55900	412500	11520	36	36
Razem	**3341000**	**1085200**	**2291800**	**6718000**		**801**	

– dla każdego etapu zatapiania dopływy do wyrobisk położonych powyżej zwierciadła wody pozostają niezmienione; dopływy do wyrobisk zatopionych ulegają zmniejszeniu proporcjonalnie do zmiany depresji wytworzonej przez wyrobiska górnicze w zasilającym je poziomie wodonośnym;

– dopływy do kopalni pochodzą z karbońskich poziomów wodonośnych o zwierciadle napiętym, ustalających się na zbliżonym poziomie.

WYNIKI OBLICZEŃ ANALITYCZNYCH

Do obliczeń objętości wolnych przestrzeni pośród oszacowanej objętości górotworu, odrębnie dla każdego przedziału obliczeniowego, szacowano wartości udziału skał wodochłonnych. Ponadto przyjęto wariant pełnego odwodnienia górotworu z wody wolnej, tzn. że pojemność wodna porów nadkapilarnych odpowiada wartości współczynnika odsączalności, który w każdym zakresie rzędnych przyjęto w wysokości $\mu = 0{,}0122$.

W obliczeniach pojemności wodnej wolnych przestrzeni powstałych bezpośrednio w wyniku prowadzonej eksploatacji górniczej uwzględniono wszystkie wolne przestrzenie, które nie zostały wcześniej wypełnione wodą. W ocenie pojemności zrobów, wyrobisk korytarzowych i szczelin poeksploatacyjnych pominięto istniejące zbiorniki wód dołowych. Pojemność wodną górotworu szacowano nie tylko nad zrobami przewidzianymi do zatopienia, lecz także nad istniejącymi zbiornikami.

Do obliczeń poszczególnych składowych pojemności wodnych w obrębie górotworu w przewidzianej do zatopienia części rozpatrywanej kopalni wydzielono sześć przedziałów obliczeniowych: cztery o miąższości po około 25 m i dwa po 12,5 m.

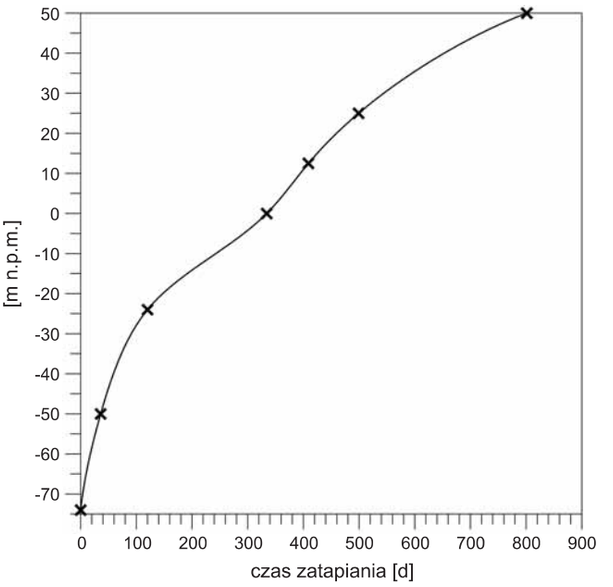

Fig. 2. Prognozowany przebieg zatapiania kopalni – metoda analityczna

Predicted flooding process in hard coal mine – analytical method

Wyniki analitycznych obliczeń przebiegu procesu zatapiania przedstawiono w tabeli 1 oraz na figurze 2.

PROGNOZA PRZEBIEGU ZATAPIANIA KOPALNI – METODA MODELOWANIA MATEMATYCZNEGO

PRZYGOTOWANIE MODELU

Matematyczny model hydrogeologiczny stworzono dla złożonych i bardzo zmienionych (na skutek eksploatacji węgla i prowadzonego odwadniania) warunków hydrogeologicznych w rejonie rozpatrywanego Ruchu. Do przygotowania modelu, jego weryfikacji, przeprowadzenia obliczeń prognostycznych oraz do wizualizacji rezultatów wykorzystano program Processing Modflow Pro ver. 7.0 (Chiang, Kinzelbach, 2001).

Bezpośrednimi badaniami modelowymi objęto obszar 8,82 km^2, podzielony na 882 kwadratowe bloki obliczeniowe o boku $\Delta x = \Delta y = 100$ m (30 wierszy i 38 kolumn). Model tworzy dziewięć warstw (fig. 3). Warstwa 1 (najwyższa) odwzorowuje czwartorzędowe piętro wodonośne. Warstwa 2 odzwierciedla lokalnie występujące wodonośne utwory triasu wraz z utworami karbonu. Pomiędzy warstwami 1 a 2 zasymulowano nieciągłe występowanie miąższego kompleksu słabo przepuszczalnych neogeńskich iłów mioceńskich. Warstwy od 3 do 9 odwzorowują utwory karbońskie: wodonośne piaskowce (warstwy 3, 5, 7 i 9) i słabo przepuszczalne pokłady węgla 116/2, 117 i 118 (warstwy 4, 6 i 8). Symulowano również występowanie bezpośrednio powyżej i poniżej pokładów węgla otuliny iłowcowej.

WERYFIKACJA MODELU

Aby wyniki obliczeń prognostycznych były wiarygodne, po utworzeniu modelu (a przed prognozą) należy przeprowadzić jego weryfikację. Proces ten polega na odtworzeniu na modelu określonego stanu hydrodynamicznego i wielkości przepływów, tak aby rezultaty generowane przez model odpowiadały rzeczywistym pomiarom hydrogeologicznym. W przygotowywanym modelu dokonywano takich zmian warunków brzegowych i wartości parametrów hydrogeolo-

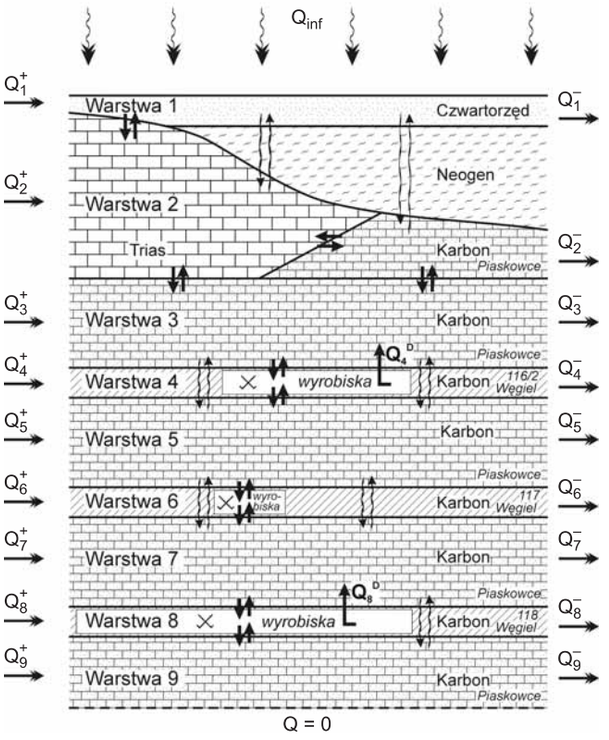

Fig. 3. Schemat ideowy wielowarstwowego modelu matematycznego obszaru badań

Q_1–Q_9 – dopływ/odpływ w obrębie warstwy, Q_{inf} – zasilanie z infiltracji opadów atmosferycznych

A scheme of multilayer mathematic model of the study area

Q_1–Q_9 – inflow/outflow within the layer, Q_{inf} – recharge to the groundwater system

Tabela 2

Dopływy do wyrobisk górniczych (Haładus i in., 2006)

Water inflows to mine excavations (after Haładus *et al*., 2006)

Warstwa modelu	Pokład	Dopływy rzeczywiste Q_R	Dopływy symulowane Q_S	Różnica pomiędzy dopływami rzeczywistymi a symulowanymi	
		[m^3/d]		[m^3/d]	[% dopływów]
4	116/2	2448,0	2304,5	143,5	6,0
6	117	~0,0	11,7	–11,7	–
8	118	9072,0	9343,6	–271,6	2,9
Razem		**11520,0**	**11659,8**	**–139,8**	1,2

Tabela 3

Wyniki badań modelowych w warunkach nieustalonych

Results of model researches in transient conditions

Etap	kalibracja modelu nieustalonego			prognoza	
Warunki filtracji	ustalone	nieustalone			
Długość etapu [dni]		111	102	251	365
Rzędna zatapiania [m n.p.m.]	–64,0	–24,0	–24,0	–24,0	17,0–18,2
Ilość odprowadzanych wód [m^3/d]	11664	2304	9572	10604	0

gicznych, by uzyskać dopływy do odpowiednich bloków odpowiadające zmierzonym rzeczywistym dopływom w poszczególnych pokładach. Kontrolowano również wynikowe położenie zwierciadła wody, aby zapewnić jego zgodność z położeniem rzeczywistym. Weryfikację prowadzono w dwóch etapach: w warunkach przepływów ustalonych i przepływów nieustalonych.

Efektem końcowym I etapu procesu weryfikacji było stworzenie matematycznego modelu hydrogeologicznego odwzorowującego warunki rzeczywiste dla stanu na połowę 2003 r. Różnice pomiędzy dopływami symulowanymi na modelu (Q_S) w poszczególnych pokładach a rzeczywistymi (Q_R) wynosiły od 12 do 272 m^3/d, przy czym maksymalny błąd wyniósł 6% (tab. 2). W odniesieniu do całkowitych mierzonych dopływów (11 520 m^3/d) uzyskane rozbieżności są niewielkie, stanowiąc zaledwie 1,2% dopływów łącznych. Biorąc pod uwagę zakres przeobrażenia warunków naturalnych przez eksploatację górniczą, stopień dopasowania modelu można uznać za bardzo wysoki.

Na bazie modelu numerycznego zweryfikowanego dla stanu na połowę 2003 r. (warunki ustalone), w drugim etapie przygotowano model filtracji dla prognozowania w czasie przebiegu procesu zatapiania rozpatrywanego Ruchu (warunki nieustalone). Poprzez korekty przyjętej pojemności wodnej na istniejącym modelu odtworzono rzeczywisty początkowy przebieg procesu zatapiania (trwający od 22.11.2003) dla dwóch stanów: po 111 dniach (12.03.2004) i po dalszych 102 dniach (22.06.2004) – tabela 3, figura 4. W rozpatrywanym okresie rzędna zwierciadła wód podziemnych uległa spiętrzeniu z –64,0 do –24 m n.p.m. Na koniec symulowanego etapu (22.06.2004) na modelu uzyskano dopływy w wysokości 9572 m^3/d, wobec rzeczywistej ilości około 9360 m^3/d wód odprowadzanych z wyrobisk (różnica ok. 2,3%).

PRZEBIEG OBLICZEŃ PROGNOSTYCZNYCH

Badania modelowe zakończono pod koniec 2004 r. Do wykonania prognoz wykorzystano ówczesny harmonogram prac, zgodnie z którym dalsze zatapianie Ruchu II planowano rozpocząć 1 marca 2005 r. Do tego czasu zakładano odwadnianie wyrobisk na dotychczasowej rzędnej (–24 m n.p.m.). Na modelu warunków nieustalonych symulowano proces zatapiania trwający kolejne 251 dni, obserwując niewielki przyrost dopływów. Obliczenia na dzień 28.02.2005 r.

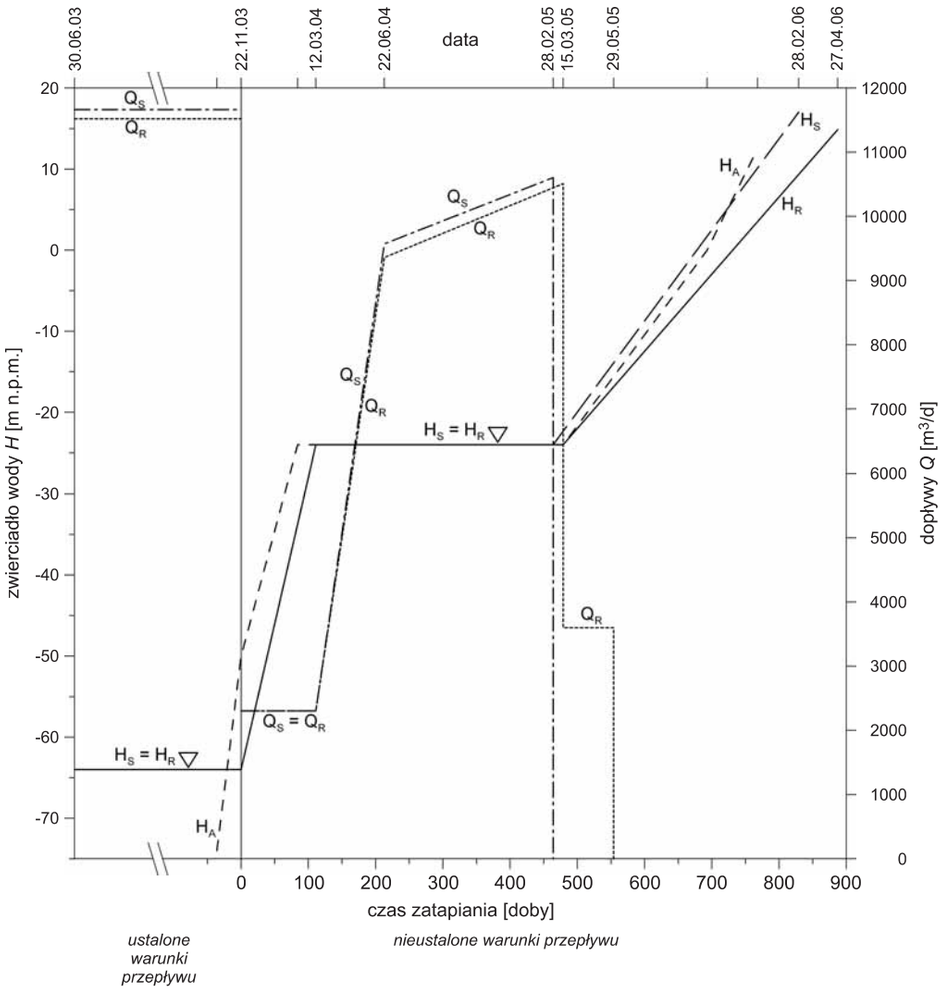

Fig. 4. Przebieg zatapiania kopalni – rzeczywisty (H_R, Q_R) oraz prognozowany metodami modelowania matematycznego (H_S, Q_S) i analityczną (H_A)

Mine flooding process: real – H_R, Q_R; predicted – H_S, Q_S, by mathematical modelling, H_A, by analytical method

prognozowały dopływ w wysokości 10 604 m^3/d, a rzeczywiste dopływy, potwierdzone późniejszymi pomiarami, wyniosły 10 510 m^3/d.

Następnie symulowano całkowite wyłączenie odwadniania z dniem 1.03.2005 r. i trwający jeden rok proces zatapiania wyrobisk i górotworu. Prognozowany na koniec zatapiania (28.02.2006 r.) poziom zwierciadła wody osiągnął rzędne od 17,0 do 18,2 m n.p.m., przy czym w rejonie szybu – 17,2 m n.p.m. Rzeczywisty proces zatapiania rozpoczął się 15 marca 2005 r., a ponadto do 29 maja 2005 r. odbierano nadal około 3600 m^3/d wody. Odwadnianie wyrobisk zakończono ostatecznie 30 maja 2005 r. W dniu 27.04.2006 r. zwierciadło wody w szybie osiągnęło poziom 14,85 m n.p.m.

PORÓWNANIE REZULTATÓW PROGNOZ

Prognozy przebiegu zatapiania Ruchu II kopalni węgla kamiennego, wykonane metodami analityczną i modelowania matematycznego, zrealizowano w różnym czasie, przy uwzględnieniu odmiennych harmonogramów likwidacji tej części kopalni. W metodzie analitycznej prognozowane czasy zatapiania zostały obliczone jako rezultat wypełniania wodą pojemności wyrobisk i górotworu w wydzielonych przedziałach głębokości, przy przyjęciu średniego dopływu określonego dla środków rozpatrywanych zakresów głębokości. Natomiast prognozę zatapiania kopalni w metodzie modelowania uzyskano symulując na zweryfikowanym matematycznym modelu warunki hydrogeologiczne rejonu Ruchu II.

Rzeczywisty przebieg zatapiania wyrobisk i górotworu odbywał się etapami. Najpierw zatopiono kopalnię do rzędnej –64 m n.p.m., na której odwadnianie utrzymywano przez kilkanaście miesięcy. Następnie, po wyłączeniu pomp 22.11.2003 r., kontynuowano do 12.03.2004 r. (tj. przez 111 dni) proces zatopienia do rzędnej –24 m n.p.m., odprowadzając w tym okresie około 25% wód dopływających. Utrzymując lustro wody na rzędnej –24 m n.p.m. obserwowano zwiększanie się dopływów, które 22.06.2004 r. (po 102 dniach) osiągnęły wartość 9360 m^3/d, a następnie po kolejnych 368 dniach pompowania (stan na 15.03.2005 r.) wzrosły do 10 510 m^3/d.

Z obliczeń analitycznych wynika, że w przedziale od –74 do –50 m n.p.m. czas zatapiania kopalni wynosi 36 dni, a łączny czas do –24 m n.p.m. sięga 120 dni (tab. 1, fig. 2). Interpolując wyniki obliczeń, w przedziale od –64 do –24 m n.p.m., przy średnim ważonym dopływie sięgającym 10 260 m^3/d, czas ten powinien wynosić 107 dni, a więc jest bardzo podobny do rzeczywistego (111 dni). Jednak rzeczywisty przebieg zatapiania górotworu odbywał się przy odprowadzaniu części dopływających wód kopalnianych (około 2400 m^3/d). Uwzględniając ten fakt, można stwierdzić, że rzeczywista prędkość zatapiania kopalni, w omawianym przedziale głębokości, była większa o około 33% od obliczonej analitycznie. Jeszcze przez ponad rok trwający wzrost dopływów był rezultatem wypełniania przez wody pojemności górotworu, głównie powyżej poziomu odwodnienia –24 m n.p.m., w wyniku formowania się leja depresji i stanu nowej równowagi hydrodynamicznej (Bukowski i in., 2005).

Od 15.03.2005 r. rozpoczęto docelowy etap zatapiania wyrobisk Ruchu II. Jednak jeszcze przez 75 dni (do 29.05.2005 r.) wypompowywano wody kopalniane w ilości około 3600 m^3/d. 27.04.2006 r., a więc po kolejnych 408 dniach zatapiania kopalni, rzędna zwierciadła wody stwierdzona w pozostawionym szybie wynosiła 14,85 m n.p.m.

Kolejny etap obliczeń analitycznych zatapiania kopalni w przedziale od –24 do 12,5 m n.p.m. porównano z przebiegiem rzeczywistym (fig. 4). Wykorzystując obliczony przedział zatapiania od 12,5 do 50 m n.p.m., zinterpolowano wyniki do rzędnej 14,85 m n.p.m. i otrzymano czas zatapiania 306 dni, przy rzeczywistym sięgającym 408 dni. Natomiast uwzględniając zaniżone dopływy przyjęte w obliczeniach, czas ten wynosiłby tylko 257 dni, a błąd sięgałby 37%. Rozbieżność prognozy byłaby jeszcze większa, gdyby proces zatapiania kopalni przebiegał w sposób ciągły.

Należy podkreślić fakt, że w prognozie analitycznej nie wykonuje się interpolacji pojemności, ponieważ metoda oparta jest na jej rozkładzie w pionie dla określonych przedziałów głębokości. Natomiast interpolacji poddawane są dopływy. Ponadto wykorzystanie parametrów charakteryzujących wolne przestrzenie, a uśrednionych dla obszaru GZW (współczynnik pojemności wodnej zrobów poeksploatacyjnych wg Rogoża), jest niepewne, związane z zachowaniem się pod wpływem wody (wytrzymałością) skał otaczających eksploatowane pokłady węglowe w różnych częściach zagłębia (Bukowski, Bukowska, 2005). Z uwagi na zmienność chłonności wodnej górotworu w zależności od strefy zbiornika w likwidowanej kopalni (Bukowski, 2007b), okresu utrzymania dynamicznego zwierciadła wody (Bukowski i in., 2007) i etapowości piętrzenia wody, rzeczywisty czas zatapiania górotworu może być krótszy od oczekiwanego. O tym mówi wartość wskaźnika chłonności wodnej górotworu $D_{ch} < 1,0$ (Bukowski, 2002; Bukowski i in., 2006), wskazując także na możliwy krótszy czas zatapiania wyrobisk górniczych w otoczeniu górotworu o niskich parametrach wytrzymałościowych.

Wielomiesięczny żmudny proces weryfikacji modelu numerycznego umożliwił stworzenie wiarygodnego matematycznego modelu warunków hydrogeologicznych rejonu Ruchu II. W warunkach stacjonarnej filtracji dopływy do kopalni odwzorowano z dokładnością 1,2%, a na etapie kalibracji modelu w warunkach nieustalonych przepływów błąd wynosił około 2,3%. Określenie warunków filtracji wody w górotworze poruszonym eksploatacją górniczą było jednak możliwe dzięki wykorzystaniu niektórych elementów metody analitycznej do modelu numerycznego.

Pierwszy etap prognozy, zrealizowany dla nieustalonych warunków filtracji, obejmował okres 251 dni (tab. 3). Przy utrzymaniu rzędnej odwodnienia na poziomie –24 m n.p.m., odtworzono dopływy z dokładnością około 0,9%. Drugi etap prognozy, przy założeniu całkowitego wyłączenia odwadniania, trwał 365 dni. Na koniec tego okresu na modelu w rejonie szybu uzyskano rzędną piętrzenia 17,2 m n.p.m., przy rzeczywistej wynoszącej 14,85 m n.p.m., osiągniętej po 408 dniach trwania tego etapu zatapiania kopalni. Pomimo rzeczywistego okresu zatapiania górotworu trwającego dłużej od prognozowanego z powodu odbioru części wód kopalnianych w początkowej fazie tego etapu, średnie dopływy były mniejsze niż symulowane na modelu. Uwzględniając ten fakt i korygując czas piętrzenia uzyskany na modelu do wartości rzeczywistej, błąd prognozy można oszacować na około 8%.

PODSUMOWANIE

Analityczna metoda prognozowania zatapiania kopalń stosowana jest od lat 70. XX w. W związku ze zróżnicowaniem właściwości skał i górotworu, zarówno w pionie, jak i w poziomie, w obszarze GZW wynik prognozy wykonywanej tą metodą jest niezwykle podatny nie tylko na błędną ocenę warunków hydrogeologicznych, ale także warunków geologiczno-górniczych, a zwłaszcza geomechanicznych. Istotne znaczenie dla wyniku prognozy w metodzie anali-

tycznej ma harmonogram prowadzenia procesu zatapiania kopalni oraz czas i zasięg oddziaływania wody w etapowym jej piętrzeniu, czyli tzw. strefowość zbiornika.

Istotnym czynnikiem decydującym o wiarygodności prognoz numerycznych jest wieloetapowy i prawidłowo przeprowadzony proces kalibracji wielowarstwowego modelu, właściwie odwzorowującego budowę geologiczną i warunki hydrogeologiczne rejonu Ruchu II. Wysoka zbieżność rezultatów badań prognostycznych z późniejszymi obserwacjami predysponuje metodykę badań modelowych do stosowania w prognozowaniu procesów zatapiania kopalń. Rozwiązania dla ruchu nieustalonego pozwalają na symulacje przebiegu zatapiania w założonych przedziałach rzędnych piętrzenia bądź w zadanych przedziałach czasowych. Zadeklarowanie odpowiednio niewielkich kroków czasowych pozwala na odwzorowanie ewentualnych zmian wynikających z uwarunkowań górniczo-technicznych (zmiana rzędnych odwadniania, przelewy do innych wyrobisk górniczych itp.). Przy zachowaniu staranności, dokładności i poprawności w konstrukcji modelu i jego kalibracji, metoda numerycznego modelowania filtracji nieustalonej powinna stać się podstawową w prognozowaniu przebiegu procesów zatapiania kopalń. W skomplikowanych warunkach budowa modelu numerycznego powinna być poprzedzona obliczeniami analitycznymi, uwzględniającymi parametry hydrogeologii kopalnianej, w tym współczynnik pojemności wodnej zrobów, współczynnik odsączalności skał zwięzłych metodą nasycenia kapilarnego oraz wskaźnik chłonności wodnej górotworu. Jednak jednym z najważniejszych czynników, decydującym o wiarygodności wykonywanych prognoz, jest poprawność danych udostępnianych przez służby geologiczne kopalni oraz doświadczenie osoby wykonującej obliczenia analityczne i badania modelowe.

LITERATURA

BROMEK T., 1977 – Nowe metody ustalania współczynnika odsączalności i współczynnika ściśliwości objętościowej skał karbońskich. Arch. Gł. Inst. Gór., Katowice.

BROMEK T., 1972 – Metoda drenażu kapilarnego do badania odsączalności piaskowców karbońskich. *Prz. Górn.*, **11**.

BUKOWSKI P., 1999a – Chłonność wodna górotworu karbońskiego w GZW i jej wpływ na przebieg zatapiania likwidowanych kopalń. Arch. Gł. Inst. Gór., Katowice.

BUKOWSKI P., 1999b – Uwagi na temat obliczania pojemności wodnej górotworu. Mat. Konf. Nauk.-Techn. Hydrogeologiczne problemy eksploatacji i likwidacji kopalń. Federacja Stowarzyszeń Naukowo-Technicznych Zagłębia Miedziowego w Legnicy, Towarzystwo Konsultantów Polskich – Zarząd Oddziału w Lubinie KGHM Polska Miedź S.A. w Lubinie.

BUKOWSKI P., 2002 – The water storage capacity of a carboniferous rock mass and its impact on the flooding process of mine workings in the Upper Silesian Coal Basin. *Archives of Mining Sciences*, **47**, 3: 385–412.

BUKOWSKI P., 2004 – Próba oceny pojemności wodnej luźnego rumoszu skalnego dla potrzeb określania pojemności wodnej zrobów zawałowych. *Wiad. górnicze,* **11**: 472–479.

BUKOWSKI P., 2007a – Sposób badania odsączalności skał zwięzłych i luźnych. Patent Urzędu Patentowego Rzeczypospolitej Polskiej nr PL 195518 B1. Udzielenie patentu z dnia 28.09.2007, ogłoszono w WUP 09/07.

BUKOWSKI P., 2007b – Zagrożenia wodne w kopalniach węgla kamiennego w Górnośląskim Zagłębiu Węglowym w dobie restrukturyzacji górnictwa. *Górnictwo i Geoinżynieria*, *Kwart. AGH*, **31**, 3/1: 81–91.

BUKOWSKI P., BUKOWSKA M., 2005 – Zmiany niektórych własności środowiska geologicznego w zbiornikach tworzonych w kopalniach węgla kamiennego w GZW. *W*: Współczesne problemy hydrogeologii, t. 12: 77–83. Wyd. UMK, Toruń.

BUKOWSKI P., GRZYBEK I., HAŁADUS A. i in., 2006 – Opracowanie metodyki prognozowania i monitorowania procesu zatapiania likwidowanych kopalń węgla kamiennego w aspekcie zapewnienia bezpieczeństwa kopalń czynnych i terenów pogórniczych. Dokumentacja merytoryczna projektu badawczego (KBN) nr 5 T12B 037 24. Gł. Inst. Gór., Katowice.

BUKOWSKI P., HAŁADUS A., MUNIAK A., 2007 – Monitoring położenia zwierciadła wody w procesie zatapiania likwidowanych wyrobisk górniczych w aspekcie oceny stanu bezpieczeństwa górniczego i powszechnego. *Pr. Nauk. GIG*, *Górnictwo i Środowisko,* **3**: 127–139. Wyd. specjalne.

BUKOWSKI P., HAŁADUS A., ZDECHLIK R., 2005 – Zatapianie wyrobisk górniczych na przykładzie wybranych kopalń węgla kamiennego w Górnośląskim Zagłębiu Węglowym. *W*: Współczesne problemy hydrogeologii, t. 12: 86–90. Wyd. UMK, Toruń.

CHIANG W.-H., KINZELBACH W., 2001 – 3D-groundwater modeling with PMWIN. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York.

HAŁADUS A., ZDECHLIK R., BUKOWSKI P., ŚWISTAK M., 2006 – Badania modelowe prognozowania procesu zatapiania kopalni na przykładzie ZG „Janina". *Prz. Górn.*, **62**, 7–8: 57–68.

MESSER E.S., 1951 – Interstitial water determination by an evaporation method. Trans. A.I.M.E, v. 192.

MOTYKA J., SZCZEPAŃSKA J., WITCZAK S., 1971 – Zastosowanie wirówki do badania współczynnika odsączalności i dynamiki oddawania wody przez skałę. *Tech. Poszuk.*, **10**, 37: 38–43.

ROGOŻ M., 1974 – Pojemność wodna zrobów w kopalniach węgla kamiennego. *Pr. Nauk. Gł. Inst. Gór*., Komunikat nr 628. Katowice.

ROGOŻ M., 2004 – Hydrogeologia kopalniana z podstawami hydrogeologii ogólnej. Wyd. Gł. Inst. Gór., Katowice.

ROGOŻ M., BUKOWSKI P., GÓRKA G., POSYŁEK E., SOLIK-HELIASZ E., STASZEWSKI B., 1995 – Wpływ likwidacji kopalni na warunki wodne w górotworze i na powierzchni. *Pr. Nauk. Gł. Inst. Gór*, Komunikat nr 805. Katowice.