

Edward CEMPIEL

## METODA WYZNACZANIA NATĘŻENIA DOPŁYWU WODY ORAZ CZASU ZATAPIANIA LIKWIDOWANEJ KOPALNI

**Streszczenie.** Przedstawiono metodę prognozowania przebiegu zatapiania wyrobisk górniczych w likwidowanej kopalni po wyłączeniu systemu głównego odwadniania. Metoda umożliwia wyznaczenie niektórych parametrów niezbędnych dla oceny konsekwencji hydrogeologicznych likwidacji kopalni.

Na bazie podstawowych praw hydrauliki wód podziemnych opracowano wzory analityczne pozwalające między innymi na wyznaczenie natężenia dopływu wody do zatapianych wyrobisk górniczych w funkcji czasu i wysokości piętrzenia oraz określanie czasu zatapiania kopalni. Wyprowadzone wzory opierają się na równaniu bilansowym, w którym całość dopływu do zatapianej kopalni rozdzielono na dwie składowe: dopływ do tworzonego zbiornika wodnego w wyniku wypełniania pustych przestrzeni w górotworze oraz zachodzący równocześnie ubytek zgromadzonej wody na skutek nieszczelności filarów granicznych w sąsiedztwie czynnych kopalń.

## METHOD DETERMINING THE FLOODING TIME OF ABANDONED WORKINGS AND WATER INFLOW INTENSITY TO THE LIQUIDATED COAL MINE

**Summary.** The paper presents the prediction method of the flooding process of abandoned workings in the liquidated coal mine after the main drainage system has been switched off, which makes it possible to determine some parameters needed to estimate the hydrogeological consequences following the liquidation of coal mines.

Basing on the fundamental laws of underground water hydraulics, analytical equations have been worked out, allowing to determine the intensity of water inflow to the abandoned workings being flooded as the function of time and swelling height, and to determine the time of coal mine flooding. The introduced equations are based on the balance equation which takes into consideration water inflow to the flooded abandoned workings from the surrounding rockmass, and loss of water amassed in abandoned workings taking place simultaneously, due to the leakage of limiting pillars in the vicinity of active coal mines.

## 1. Wprowadzenie

Po wyłączeniu systemu głównego odwadniania w likwidowanej kopalni rozpoczyna się proces zatapiania wyrobisk górniczych wodą pochodzącą z dopływu naturalnego z otaczającego górotworu, z warstw wodonośnych nadal drenowanych przez wyrobiska jednak z malejącą intensywnością. Napływająca woda wypełnia puste przestrzenie w górotworze poczynając od najniższych poziomów eksploatacyjnych i stopniowo zatapia coraz to wyższe poziomy. W przypadku łączności hydraulicznej pomiędzy wyrobiskami na poszczególnych poziomach, w zrobach zlikwidowanej kopalni utworzy się rozległy zbiornik wodny, którego pojemność w miarę piętrzenia wody będzie systematycznie wzrastać. Proces zatapiania zakończy się w chwili, gdy w rejonie zlikwidowanej kopalni ustalą się warunki hydrodynamiczne odpowiadające nowemu układowi drenażu wód podziemnych.

Przebieg piętrzenia wody uzależniony będzie od warunków hydrogeologicznych i górniczych w rejonie likwidowanej kopalni, w tym przede wszystkim od zawodnienia warstw nadkładu i serii złożowej, wodochłonności zrobów i górotworu oraz szczelności filarów granicznych.

Przedstawiona poniżej metoda prognozowania przebiegu zatapiania wyrobisk górniczych umożliwia wyznaczanie niektórych parametrów niezbędnych dla ocen prognostycznych konsekwencji hydrogeologicznych likwidacji kopalni:

- zmian natężenia dopływu wody do zatapianych zrobów w funkcji czasu i wysokości piętrzenia,
- zmian natężenia filtracji wody przez filary graniczne do kopalń sąsiednich w funkcji wysokości piętrzenia,
- maksymalnej wysokości piętrzenia wody w zrobach,
- czasu zatapiania zrobów na poszczególnych poziomach.

Metoda może być stosowana w kopalniach odosobnionych, czyli takich, które nie mają bezpośrednich połączeń hydraulicznych z kopalniami sąsiednimi. W kopalniach zespolonych, gdzie istnieją bezpośrednie połączenia hydrauliczne poprzez wyrobiska i zroby, warunkujące grawitacyjny przelew wód do sąsiednich kopalń, metoda może być stosowana dla oceny piętrzenia wody do wysokości tych połączeń. Przedstawiona metoda została wykorzystana do oceny przebiegu zatapiania przeznaczonej do likwidacji kopalni Gliwice [1].

## 2. Czynniki warunkujące przebieg procesu zatapiania kopalni

Przebieg procesu zatapiania wyrobisk górniczych likwidowanej kopalni jest ściśle związany z istniejącym układem hydrogeologicznym złoża oraz modelem kopalni uformowanym w wyniku prowadzonych dotychczas robót górniczych. Stan początkowy procesu zatapiania odnosi się do chwili wyłączenia systemu głównego odwadniania kopalni i odpowiada stanowi, jaki występował w końcowej fazie funkcjonowania kopalni czynnej.

Prognoza przebiegu zatapiania likwidowanej kopalni opiera się na istniejącym rozpoznaniu układu hydrogeologicznego złoża i stanu zawodnienia z okresu czynnej działalności kopalni. Podstawowe znaczenie ma znajomość dopływów wody na poszczególnych poziomach oraz stopnia zdrenowania górotworu. Szczególnie istotne jest rozpoznanie łączności hydraulicznej pomiędzy poziomami wodonośnymi rozciętymi siecią wyrobisk górniczych a nadległymi poziomami wodonośnymi warstw nadkładu oraz ocena udziału w dopływie do kopalni wód infiltrujących z nadkładu. Niezbędne jest również rozpoznanie własności kolektorskich warstw wodonośnych i górotworu oraz zmian tych własności na skutek oddziaływania robót górniczych, w tym w szczególności rozpoznanie własności filtracyjnych górotworu w strefach filarów granicznych. Do oceny czasu zatapiania kopalni konieczna jest znajomość pojemności wodnej zrobów oraz wodochłonności zdrenowanego górotworu.

W celu opracowania prognozy procesu zatapiania kopalni istotne znaczenie ma określenie podstawowych zależności funkcyjnych opisujących przebieg procesu oraz wyznaczenie wartości parametrów hydrogeologicznych i górniczych determinujących proces.

Można założyć, że woda dopływająca z warstw wodonośnych otaczającego górotworu do wyrobisk górniczych zatapianej kopalni jest rozdzielana na dwie składowe:

- następuje wypełnianie wodą pustych przestrzeni, a gromadzona woda tworzy zbiornik wodny w górotworze,
- równocześnie ma miejsce ubytek gromadzonej wody na skutek filtracji przez nieszczelne filary graniczne w sąsiedztwie czynnych kopalń.

Przebieg procesu zatapiania kopalni kształtowany jest przez dopływ wody do zatapianych zrobów z otaczającego górotworu oraz zachodzący równocześnie ubytek wody zgromadzonej w zrobach na skutek nieszczelności filarów granicznych, co można wyrazić następującym równaniem bilansowym:

$$Q = Q_z + Q_f \quad (1)$$

W równaniu bilansowym (1) po stronie przychodu uwzględniono całkowity dopływ pochodzący z rozciętych wyrobiskami warstw wodonośnych na wszystkich poziomach ( $Q$ ), a po stronie rozchodu wydatek wody zużytkowanej na wypełnianie pustych przestrzeni górotworu w obrębie tworzącego się w zrobach zbiornika wodnego ( $Q_z$ ) oraz ubytek wody spiętrzonej w zrobach na skutek jej filtracji w kierunku kopalń sąsiednich poprzez nieszczelne filary graniczne ( $Q_f$ ). Na podstawie równania (1), po jego rozwinięciu, można wyprowadzić szczegółowe wzory umożliwiające ocenę zmian wielkości dopływu w okresie zatapiania kopalni, ocenę przebiegu zatapiania zrobów w czasie, jak również określenie maksymalnej wysokości piętrzenia wody w zatapianej kopalni w przypadku filtracji wody przez filary graniczne.

Przebieg piętrzenia wody w górotworze jest wypadkową oddziaływania dwóch przeciwstawnych czynników związanych z podnoszeniem się zwierciadła wody:

- malejącego dopływu wody z otaczającego górotworu do zbiornika wodnego tworzącego się w zrobach zlikwidowanej kopalni na skutek zmniejszającej się systematycznie depresji,
- stopniowo wzrastającego natężenia filtracji wody ze zbiornika poprzez nieszczelne filary graniczne na skutek rosnącej wysokości piętrzenia wody, a tym samym zwiększającego się naporu hydrostatycznego w zbiorniku.

Zmiany warunków krążenia wody w otoczeniu zatapianej kopalni są wkomponowane w regionalny obraz kształtowania się warunków hydrodynamicznych warstw wodonośnych serii złożowej i nadkładu. Zmiany te w ujęciu ilościowym obejmują wody bliskich, a także dalekich obszarów krążenia, które mają coraz mniejszy udział w dopływie do zatapianej kopalni, co wyraża się stopniowo malejącym dopływem w ślad za malejącą depresją i wzrastającą rzędną piętrzenia wody w wyrobiskach.

### 3. Dopływ wody do likwidowanej kopalni

Rozległa sieć wyrobisk górnictwowych w likwidowanej kopalni stanowi z hydrodynamicznego punktu widzenia bardzo skomplikowany i rozległy układ drenów. Dla praktycznej oceny zmiany dopływów w miarę postępu zatapiania kopalni konieczne jest wprowadzenie pewnych uproszczeń w schemacie obliczeniowym, wobec dużego stopnia skomplikowania układu

wyrobisk górniczych oraz budowy geologicznej i warunków hydrogeologicznych drenowanego górotworu.

Wpływy wody w wyrobiskach górniczych pochodzą zarówno z zasobów statycznych wody wypełniającej drenowane warstwy wodonośne, jak i z zasobów dynamicznych pochodzących z infiltracji wód opadowych i powierzchniowych oraz z poziomów wodonośnych występujących w nadkładzie serii złożowej. Całkowity dopływ wody do czynnej kopalni ( $Q_0$ ) jest sumą dopływów notowanych na poszczególnych poziomach eksploatacyjnych ( $Q_1, Q_2, \dots Q_k$ ):

$$Q_0 = Q_1 + Q_2 + \dots + Q_k = \sum_{k=1}^n Q_k \quad (2)$$

Schemat obliczeniowy kształtowania się dopływu wody do zatapianej kopalni oparty został na podstawowych prawach ruchu wód podziemnych, przy wykorzystaniu upraszczających założeń sformułowanych przez M.Rogoża [7]:

- dopływy do kopalni na każdym poziomie eksploatacyjnym ( $Q_1, Q_2, \dots Q_k$ ) pochodzą głównie z poziomów wodonośnych o zwierciadle napiętym, czyli dopływ wody jest liniową funkcją depresji; na tej podstawie możemy wyznaczyć dla każdego poziomu eksploatacyjnego wydatki jednostkowe  $q_k$ , znając dopływ wody  $Q_k$  i depresję  $S_k$ :

$$q_k = \frac{Q_k}{S_k} \quad (3a)$$

- powierzchnie piezometryczne poziomów wodonośnych serii złożowej ustalają się na tej samej rzędnej  $Z$ , a maksymalna depresja zwierciadła piezometrycznego  $S_k$  na danym poziomie eksploatacyjnym odnoszona jest do spągu wyrobisk,
- w miarę postępu zatapiania kopalni następuje podnoszenie się zwierciadła wody w wyrobiskach górniczych, a tym samym wzrasta wysokość piętrenia wody  $h$  i zmniejsza się równocześnie depresja  $S$ ; dla celów obliczeniowych przyjęto, że wysokość piętrenia wody  $h$  będzie zawsze liczona od najniższego zatapianego poziomu, dla którego maksymalna depresja wynosi  $S_1=H$  ( $H$ -wysokość naporu hydrostatycznego odniesiona do najniższego zatapianego poziomu), co można zapisać:

$$S = H - h \quad \text{lub} \quad S = S_1 - h \quad (3b)$$

- dopływy do wyrobisk zatopionych  $Q_{Sk}$  ulegają zmniejszeniu proporcjonalnie do zmniejszenia depresji  $S$  wytworzonej w wyniku spiętrenia wody w wyrobiskach górniczych:

$$Q_{Sk} = q_k \cdot S \quad (4a)$$

- dopływy wody do wyrobisk usytuowanych powyżej spiętrzonego zwierciadła wody, w tym również dopływy wód infiltrujących z nadkładu, w każdej fazie zatapiania pozostają niezmiennione:

$$Q_{Sk} = Q_k = \text{const} \quad \dots\dots \quad (4b)$$

Do oceny dopływu  $Q$  do zatapianej kopalni można wykorzystać równanie (2), którego postać po uwzględnieniu założeń wyrażonych wzorami (3) i (4) ulegnie odpowiedniej modyfikacji w zależności od aktualnej wysokości zatopienia wyrobisk. W początkowym okresie piętrzenia wody, gdy aktualnie zatapiane są wyrobiska na najniższym poziomie, gdzie uprzednio dopływ wody wynosił  $Q_1$  przy depresji  $S_1$ , równanie (2) przyjmie postać:

$$Q = \left( \frac{Q_1}{S_1} \right) \cdot S + Q_2 + \dots + Q_k \quad \text{lub} \quad Q = q_1 \cdot S + Q_2 + \dots + Q_k \quad (5a)$$

W miarę zatapiania kolejnych poziomów należy dla wszystkich poziomów zatopionych uwzględnić zmniejszanie się dopływu w funkcji depresji. W końcowym okresie piętrzenia wody, gdy zatapiane będą wyrobiska na najwyższym poziomie, równanie (2) przyjmie postać:

$$Q = \left( \frac{Q_1}{S_1} + \frac{Q_2}{S_2} + \dots + \frac{Q_k}{S_k} \right) \cdot S \quad \text{lub} \quad Q = (q_1 + q_2 + \dots + q_k) \cdot S \quad (5b)$$

Poniżej podano przykład określania dopływu  $Q$  do zatapianej kopalni składającej się z dwóch poziomów ( $k = 2$ ). Dopływ wody w okresie czynnej działalności kopalni wynosił na poziomie dolnym  $Q_1$ , a na poziomie górnym  $Q_2$ , natomiast depresja wytwarzana przez wyrobiska górnicze na tych poziomach wynosiła odpowiednio  $S_1$  i  $S_2$ , przy czym:  $S_1 > S_2$ . Biorąc pod uwagę, że w fazie zatapiania poziomu dolnego dopływ do zatapianych wyrobisk pochodzący z tego poziomu ulega zmniejszeniu proporcjonalnie do zmniejszającej się w wyniku piętrzenia wody depresji  $S$  ( $S_2 < S < S_1$ ), natomiast dopływ z poziomu górnego pozostaje bez zmian, możemy sformułować następujące równanie:

$$Q = \frac{Q_1}{S_1} \cdot S + Q_2 \quad \text{lub} \quad Q = q_1 \cdot S + Q_2 \quad (5a_1)$$

W przypadku dalszego spiętrzenia wody, w fazie zatapiania wyrobisk poziomu górnego, należy również dla tego poziomu uwzględnić zmniejszanie się dopływu wody w funkcji depresji  $S$  ( $0 < S < S_2$ ):

$$Q = \left( \frac{Q_1}{S_1} + \frac{Q_2}{S_2} \right) \cdot S \quad \text{lub} \quad Q = (q_1 + q_2) \cdot S \quad (5b_1)$$

Przedstawiony powyżej schemat obliczeniowy można zastosować w przypadku całkowitego zatapiania kopalni, realizowanego przy równoczesnym wyłączeniu systemów odwadniających na wszystkich poziomach lub też w przypadku częściowego zatapiania kopalni obejmującego najniższe poziomy, gdy następuje okresowe wyłączenie systemów odwadniania na poziomach wyższych. W tych warunkach do zatapianych wyrobisk na danym poziomie (począwszy od najniższego) dopływają wody pochodzące ze wszystkich poziomów, które przelewają się z poziomu wyższego na niższy aktualnie zatapiany. Schemat obliczeniowy można łatwo dostosować do różnych wariantów częściowego zatapiania kopalni.

#### 4. Ocena filtracji wody w strefach filarów granicznych

Filarem granicznym nazywany jest maszyn skalny rozdzielający dwie sąsiednie kopalnie, w obrębie którego nie były prowadzone roboty eksploatacyjne. Szerokość filara granicznego można określić na podstawie map górniczych, wyznaczając położenie krawędzi robót eksploatacyjnych w sąsiadujących kopalniach.

Niedostateczna szczelność filara granicznego jest przyczyną ucieczki wody ze zbiornika utworzonego w wyrobiskach zatapianej kopalni, skąd woda przepływa w kierunku wyrobisk sąsiedniej czynnej kopalni.

Schematyzując warunki filtracji wody w rejonie filara granicznego, natężenie przepływu wody przez warstwy skalne, oddzielające zbiornik wodny w zrobach zlikwidowanej kopalni od wyrobisk górniczych sąsiedniej czynnej kopalni, można obliczać jak filtrację jednowymiarową, podlegającą prawu Darcy. Natężenie filtracji wody będzie uzależnione przede wszystkim od wykształcenia litologicznego, przepuszczalności i stopnia szczelności warstw skalnych tworzących filar oraz wysokości naporu hydrostatycznego w zbiorniku. Jeżeli głównymi drogami przewodzenia wody w obrębie filara będą warstwy przepuszczalne o ograniczonej miąższości, występujące wśród kompleksu skał nieprzepuszczalnych, przepływ ten można traktować jako filtrację w warunkach naporowych, uzależnioną od współczynnika filtracji warstw przepuszczalnych. Wzór obliczeniowy określający natężenie filtracji wody ( $Q_n$ ) przyjmie postać:

$$Q_{fl} = \frac{L \cdot k_s \cdot m}{B} \cdot h \quad \text{lub} \quad Q_{fl} = q_{fa} \cdot h \quad (6a)$$

Jeżeli o przepływie wody decydować będą zarówno własności filtracyjne skał przepuszczalnych, jak też spękania i szczeliny obejmujące cały maszyn skalny, właściwszym modelem będzie przyjęcie filtracji w warunkach swobodnych, przy współczynniku filtracji odnoszonym do całego górotworu. W tym przypadku natężenie filtracji wody ( $Q_{fl}$ ) można określić na podstawie wzoru:

$$Q_{fl} = \frac{L \cdot k_g}{2B} \cdot h^2 \quad \text{lub} \quad Q_{fl} = q_{fb} \cdot h^2, \quad (6b)$$

gdzie:  $L$  - długość filara, na którym zachodzi filtracja,

$k_s$  - współczynnik filtracji warstw przepuszczalnych,

$k_g$  - współczynnik filtracji górotworu,

$B$  - szerokość filara,

$m$  - miąższość warstw wodonośnych,

$h$  - wysokość piętrzenia wody liczona od najgłębszego zatopionego poziomu.

W niektórych przypadkach filary graniczne rozcięte są wyrobiskami korytarzowymi wykonanymi z dwu sąsiednich kopalń, przy czym wyrobiska te zbliżają się do siebie niekiedy na niewielką odległość. W miejscach zbliżeń, gdzie sąsiadujące wyrobiska korytarzowe kopalni zatopianej i kopalni czynnej rozcinają te same warstwy przepuszczalne, istnieje pomiędzy wyrobiskami łączność hydrauliczna uwarunkowana przepuszczalnością skał, co umożliwi filtrację wody z jednego wyrobiska do drugiego pod wpływem zaistniałej różnicy naporów hydrostatycznych.

W warunkach piętrzenia wody w zatopianej kopalni natężenie filtracji z wyrobiska korytarzowego zatopionego do wyrobiska niezatopionego ( $Q_{fw}$ ) można obliczyć za pomocą wzoru Forchheimera [2, 8, 9], traktując zatopione wyrobisko jako studnię chłonną (właczającą wodę do górotworu), a wyrobisko niezatopione jako studnię drenującą:

$$Q_{fw} = \frac{2\pi \cdot k \cdot m}{\ln(d/r)} \cdot h \quad \text{lub} \quad Q_{fw} = q_{fw} \cdot h, \quad (7)$$

gdzie:  $k$  - współczynnik filtracji warstw przepuszczalnych,

$m$  - miąższość warstw przepuszczalnych,

$d$  - odległość między wyrobiskiem zatopionym i niezatopionym,

$r$  - promień zastępczy wyrobiska:

$$r = \sqrt{F/\pi}$$



F - przekrój poprzeczny wyrobiska,

h - wysokość słupa wody spiętrzonej w zrobach, liczona od spągu wyrobiska zatopionego.

Całkowite natężenie filtracji wody przez filar graniczny w kierunku kopalni czynnej będzie wynosić:

$$Q_f = Q_n + Q_{fw} \quad (8)$$

Wiarygodność obliczeń filtracji wody w strefach filarów granicznych według przedstawionych powyżej wzorów jest ściśle uzależniona od dokładności rozpoznania przepuszczalności górotworu w obrębie tych stref.

## 5. Dopływ wody wypełniającej zatapiane wyrobiska

W okresie zatapiania kopalni woda dopływająca z otaczających warstw wodonośnych wypełnia stopniowo wyrobiska i zdrenowane warstwy skalne, tworząc w górotworze rozległy zbiornik wodny o systematycznie wzrastającym poziomie piętrzenia. W przypadku nieszczelnych filarów granicznych następuje równocześnie ucieczka części wody ze zbiornika, co omówiono w rozdz. 4.

Natężenie dopływu wody wypełniającej zatapiane wyrobiska  $Q_z$  (woda ta zużywana jest w całości na wypełnienie wolnych przestrzeni w górotworze) można wyznaczyć na podstawie równania bilansowego (1), po przekształceniu i rozwinięciu tego równania z uwzględnieniem zależności podanych w rozdz. 3 i 4.

Poniżej wyprowadzono wzory dla przypadku zatapiania kopalni dwupoziomowej, przy uwzględnieniu zależności (5) i (6). Należy zaznaczyć, że dla większej ilości poziomów wyprowadzenie wzorów jest identyczne, jednak wzory te są znacznie bardziej rozbudowane.

### A. Dopływ do zrobów ( $Q_z$ ) przy uwzględnieniu ubytku wody w wyniku filtracji naporowej przez filar graniczny ( $Q_f$ wg wzoru 6a)

#### 1. Zatapianie poziomu dolnego:

$$Q_z = Q - Q_f$$

$$Q_z = \frac{Q_1}{S_1} \cdot S + Q_2 - q_{fa} \cdot h$$

$$Q_z = \frac{Q_1}{S_1} \cdot (S_1 - h) + Q_2 - q_{fa} \cdot h$$

$$Q_z = q_1 \cdot S_1 + Q_2 - (q_1 + q_{fa}) \cdot h \quad (9a)$$

2. Zatapianie poziomu górnego:

$$Q_z = \left( \frac{Q_1}{S_1} + \frac{Q_2}{S_2} \right) \cdot S - q_{fa} \cdot h$$

$$Q_z = \left( \frac{Q_1}{S_1} + \frac{Q_2}{S_2} \right) \cdot (S_1 - h) - q_{fa} \cdot h$$

$$Q_z = (q_1 + q_2) \cdot S_1 - (q_1 + q_2 + q_{fa}) \cdot h \quad (9b)$$

Z równań (9a) i (9b) wynika, że w miarę piętrzenia wody natężenie dopływu do zrobów będzie się obniżało według zależności liniowej.

**B. Dopływ do zrobów ( $Q_z$ ) przy uwzględnieniu ubytku wody w wyniku filtracji swobodnej przez filar graniczny ( $Q_f$  wg wzoru 6b)**

1. Zatapianie poziomu dolnego:

$$Q_z = Q - Q_f$$

$$Q_z = \frac{Q_1}{S_1} \cdot S + Q_2 - q_{fb} \cdot h^2$$

$$Q_z = \frac{Q_1}{S_1} \cdot (S_1 - h) + Q_2 - q_{fb} \cdot h^2$$

$$Q_z = q_1 \cdot S_1 + Q_2 - q_1 \cdot h - q_{fb} \cdot h^2 \quad (10a)$$

2. Zatapianie poziomu górnego:

$$Q_z = \left( \frac{Q_1}{S_1} + \frac{Q_2}{S_2} \right) \cdot S - q_{fb} \cdot h^2$$

$$Q_z = \left( \frac{Q_1}{S_1} + \frac{Q_2}{S_2} \right) \cdot (S_1 - h) - q_{fb} \cdot h^2$$

$$Q_z = (q_1 + q_2) \cdot S_1 - (q_1 + q_2) \cdot h - q_{fb} \cdot h^2 \quad (10b)$$

Z równań (10a) i (10b) wynika, że natężenie dopływu wody do zatapianych wyrobisk będzie się obniżało według zależności parabolicznej.

## 6. Maksymalna wysokość piętrzenia wody w zatapianej kopalni

Ocena wysokości piętrzenia wody w wyrobiskach górniczych zatapianej kopalni wymaga analizy zarówno szczelności (przepuszczalności), jak też wytrzymałości filarów granicznych, co ma istotne znaczenie przy formułowaniu uwarunkowań hydrogeologicznych i górniczych całkowitego lub częściowego zatopienia kopalni [5].

Przy rozważaniu wysokości piętrzenia wody w wyrobiskach zatapianej kopalni należy brać pod uwagę:

- możliwą do osiągnięcia wysokość piętrzenia ze względu na ucieczkę wody przez nieszczelne filary graniczne,
- dopuszczalną wysokość piętrzeniu ze względu na warunki bezpieczeństwa kopalń sąsiednich.

Przy określaniu możliwej do osiągnięcia wysokości piętrzenia wody wprowadza się z góry założenie, że nie ma żadnych ograniczeń wysokości piętrzeniu wody w zrobach zatapianej kopalni, a tym samym pod względem wytrzymałości i stateczności filarów granicznych spełnione są kryteria bezpieczeństwa w aspekcie zagrożeń wodnych kopalń sąsiednich. W przeciwnym przypadku, ze względu na bezpieczeństwo kopalń sąsiednich, wysokość piętrzenia wody nie może przekroczyć wartości dopuszczalnej.

Możliwa do osiągnięcia wysokość piętrzenia wody w wyrobiskach zatapianej kopalni jest uzależniona od przepuszczalności filarów granicznych. W przypadku nieszczelnych filarów granicznych, w warunkach przenikania wody przez te filary do wyrobisk górniczych kopalń sąsiednich, wysokość piętrzenia wody będzie określona warunkami równowagi między dopływem do kopalni a odpływem wody na zewnątrz zbiornika.

Do określenia maksymalnej możliwej wysokości piętrzenia wody w zatapianej kopalni  $h_m$  można wykorzystać równania (9) i (10), w których należy podstawić:  $h = h_m$  oraz  $Q_z = 0$ . Ostateczna postać równania zastosowanego do obliczeń parametru  $h_m$  będzie zależała od tego, w jakiej fazie zatapiania wyrobisk nastąpi zrównanie dopływu do zatapianej kopalni z ubytkami wynikającymi z przesączania wody przez filary graniczne, czyli będzie spełniony warunek:  $Q = Q_r$ . Na podstawie równań (9a) lub (10a) możemy sprawdzić, czy powyższy warunek będzie już spełniony w fazie zatapiania poziomu dolnego, wtedy obliczona wartość  $h_m$  musi spełniać nierówność:  $h_m < S_1 - S_2$ . Niespełnienie tej nierówności oznacza, że zrównanie dopływu do zatapianej kopalni z ubytkami wody przeciekającej przez filary graniczne nastąpi

dopiero w fazie zatapiania poziomu górnego, a więc wartość parametru  $h_m$  należy wyznaczyć z równań (9b) lub (10b).

Dla przypadku ustabilizowania się warunków przepływu wody w górotworze w okresie zatapiania poziomu górnego maksymalną wysokość spiętrzenia wody  $h_m$  możemy określić:

- ze wzoru uzyskanego poprzez przekształcenie równania liniowego (9b):

$$h_m = \frac{(q_1 + q_2) \cdot S_1}{q_1 + q_2 + q_{fa}} \quad (11)$$

- ze wzoru uzyskanego w wyniku rozwiązywania równania kwadratowego (10b):

$$h_m = \frac{1}{2q_{fb}} \left( \sqrt{(q_1 + q_2)^2 + 4q_{fb} \cdot (q_1 + q_2) \cdot S_1} - (q_1 + q_2) \right) \quad (12)$$

Wartość parametru  $h_m$  obliczona według powyższych wzorów powinna spełniać nierówność:  $h_m < S_1$ .

## 7. Ocena czasu zatapiania kopalni

Prognoza przebiegu zatapiania kopalni w czasie wymaga uprzedniej oceny pojemności wodnej zrobów i wodochłonności warstw skalnych. Ze względu na skomplikowaną geometrię wyrobisk górniczych, nieregularne rozmieszczenie wyrobisk w profilu pionowym oraz zróżnicowane natężenie dopływów, będące funkcją głębokości zwierciadła wody, obliczenia czasu zatapiania prowadzi się dla określonych przedziałów głębokościowych, charakteryzujących się zbliżonymi wartościami parametrów obliczeniowych.

M.Rogoż [7] przedstawia następującą procedurę obliczania czasu zatapiania wyrobisk, przystosowaną do obliczeń realizowanych metodą komputerową:

- wyznacza się poziomy ograniczające interwały obliczeniowe, poczynając od poziomu rzępią głównego odwadniania,
- na podstawie pojemności wyrobisk w poszczególnych interwałach głębokościowych ( $\Delta V$ ) oblicza się średnie wartości dopływów wody do poszczególnych interwałów ( $Q_{zsr}$ ), jako średnie arytmetyczne dopływów odpowiadających położeniom zwierciadła wody na poziomach ograniczających dany interwał z góry i z dołu,

- oblicza się czas zatapiania wyrobisk w przyjętych interwałach, poczynając od najniższego i sumując narastająco; czas zatapiania wyrobisk górniczych ( $\Delta t$ ) w obrębie danego interwału jest ilorazem pojemności wodnej ( $\Delta V$ ) przez natężenie dopływu ( $Q_{zsr}$ ):

$$\Delta t = \frac{\Delta V}{Q_{zsr}} \quad (13)$$

W podanej wyżej procedurze obliczeniowej zakłada się podział zatapianego górotworu w obrębie poszczególnych poziomów na liczne interwały głębokościowe, co jest konieczne z uwagi na przyjęty sposób uśredniania dopływów.

Poniżej wyprowadzono wzory analityczne pozwalające na wyznaczenie czasu zatapiania wyrobisk w obrębie danego poziomu ( $t$ ) przy uwzględnieniu zmian dopływu ( $Q_z$ ) zachodzących z wysokością piętrzenia wody ( $h$ ). Zmiany te mogą być wyrażone funkcją liniową lub paraboliczną w zależności od warunków kształtujących przepływ wody w zatapianych wyrobiskach, co opisują równania (9) i (10).

Biorąc pod uwagę dopływ wody ( $Q_z$ ) zużywanej na wypełnianie wolnych przestrzeni w górotworze ( $V_p$ ) w obrębie zatapianych wyrobisk, zachodzący w czasie ( $t$ ) proces piętrzenia wody ( $h$ ) możemy opisać równaniem różniczkowym:

$$Q_z \cdot dt = dV_p$$

Przyjmując, że dla danego zatapianego poziomu znana jest objętość wolnych przestrzeni w górotworze wchłaniających wodę ( $V_p$ ) oraz wysokość poziomu ( $h_p$ ), możemy przyrost  $dV_p$  zapisać w postaci:  $dV_p = (V_p / h_p) \cdot dh$ . Podstawiając to wyrażenie do powyższego równania, otrzymamy:

$$Q_z \cdot dt = \frac{V_p}{h_p} \cdot dh$$

$$dt = \frac{V_p}{h_p} \cdot \frac{dh}{Q_z} \quad (14)$$

Rozwiązanie uzyskamy jako całkę oznaczoną, całkując wyrażenia występujące po obydwu stronach równania odpowiednio w granicach od  $t_0$  do  $t_1$  oraz od  $h_0$  do  $h_1$ :

$$t_{0-1} = \frac{V_p}{h_p} \int_{h_0}^{h_1} \frac{dh}{Q_z} \quad (15)$$

Równanie ogólne (15) możemy rozwiązać dla różnych przypadków szczególnych, podstawiając w tym równaniu w miejsce  $Q_z$  zależności wyrażone wzorami (9) lub (10).

W przypadku gdy w równaniu (15) wstawimy w miejsce  $Q_z$  zależność wyrażoną wzorem (9a), otrzymamy równanie określające czas zatapiania górotworu w obrębie poziomu dolnego, którego pojemność wodna wynosi  $V_{p1}$ , a wysokość  $h_{p1}$ :

$$t = \frac{V_{p1}}{h_{p1}} \int_{h_0}^{h_1} \frac{dh}{q_1 \cdot S_1 + Q_2 - (q_1 + q_{fa}) \cdot h}$$

Po scałkowaniu powyższego wyrażenia uzyskamy rozwiązanie w postaci:

$$t = \frac{V_{p1}}{h_{p1} \cdot (q_1 + q_{fa})} \cdot \ln \left( \frac{q_1 \cdot S_1 + Q_2 - (q_1 + q_{fa}) \cdot h_0}{q_1 \cdot S_1 + Q_2 - (q_1 + q_{fa}) \cdot h_1} \right) \quad (16a)$$

Czas zatapiania górotworu w obrębie poziomu górnego o pojemności wodnej  $V_{p2}$  i wysokości  $h_{p2}$  możemy określić na podstawie wzoru (16b). Wzór ten otrzymamy po obustronnym scałkowaniu równania (15), w którym uprzednio w miejsce  $Q_z$  należy wstawić zależność wyrażoną wzorem (9b):

$$t = \frac{V_{p2}}{h_{p2} \cdot (q_1 + q_2 + q_{fa})} \cdot \ln \left( \frac{(q_1 + q_2) \cdot S_1 - (q_1 + q_2 + q_{fa}) \cdot h_1}{(q_1 + q_2) \cdot S_1 - (q_1 + q_2 + q_{fa}) \cdot h_2} \right) \quad (16b)$$

W przypadku gdy  $Q_z$  wyrażone będzie zależnościami (10a) lub (10b), to po ich wstawieniu do równania (15) i scałkowaniu prawej strony równania względem zmiennej  $h$  otrzymamy wzory określające czas zatapiania górotworu odpowiednio w obrębie poziomu dolnego - wzór (17a) oraz poziomu górnego - wzór (17b):

$$t = \frac{V_{p1}}{h_{p1} \cdot \sqrt{\Delta_1}} \cdot \ln \left( \frac{(q_1 + \sqrt{\Delta_1} + 2q_{fb} \cdot h_1) \cdot (q_1 - \sqrt{\Delta_1} + 2q_{fb} \cdot h_0)}{(q_1 - \sqrt{\Delta_1} + 2q_{fb} \cdot h_1) \cdot (q_1 + \sqrt{\Delta_1} + 2q_{fb} \cdot h_0)} \right) \quad (17a)$$

gdzie:

$$\Delta_1 = q_1^2 + 4q_{fb} \cdot (h_1 \cdot S_1 + Q_2)$$

$$t = \frac{V_{p2}}{h_{p2} \cdot \sqrt{\Delta_2}} \cdot \ln \left( \frac{(q_1 + q_2 + \sqrt{\Delta_2} + 2q_{fb} \cdot h_2) \cdot (q_1 + q_2 - \sqrt{\Delta_2} + 2q_{fb} \cdot h_1)}{(q_1 + q_2 - \sqrt{\Delta_2} + 2q_{fb} \cdot h_2) \cdot (q_1 + q_2 + \sqrt{\Delta_2} + 2q_{fb} \cdot h_1)} \right) \quad (17b)$$

gdzie:

$$\Delta_2 = (q_1 + q_2)^2 + 4q_{fb} \cdot (q_1 + q_2) \cdot S_1$$

Czas zatapiania  $t$  obliczony według wzorów (16) i (17) określa interwał czasu wyznaczony wzrostem zwierciadła wody  $h$  w przedziale wysokości od  $h_0$  do  $h_n$  licząc od spągu najniższego poziomu eksploatacyjnego zatapianej kopalni (przyjęty poziom zerowy) do spągu kolejnych wyższych poziomów lub w wydzielonym przedziale wysokościowym danego zatapianego poziomu.

## 8. Podsumowanie i wnioski końcowe

Przebieg zatapiania wyrobisk górniczych likwidowanej kopalni jest ściśle związany z istniejącym układem hydrogeologicznym złoża oraz modelem kopalni uformowanym w wyniku prowadzonych dotychczas robót górniczych. Piętrzenie wody w zrobach jest wypadkową działania dwóch przeciwstawnych czynników związanych z podnoszeniem się zwierciadła wody:

- malejącego dopływu wody z otaczającego górotworu do tworzącego się w zrobach zbiornika wodnego na skutek zmniejszającej się systematycznie depresji,
- stopniowo wzrastającego natężenia filtracji wody ze zbiornika poprzez nieszczelne filary graniczne na skutek rosnącej wysokości piętrzenia wody, a tym samym zwiększającego się naporu hydrodynamicznego w zbiorniku.

Na bazie podstawowych praw hydrauliki wód podziemnych opracowane zostały wzory analityczne, które pozwalają na wyznaczenie natężenia dopływu wody do zatapianych wyrobisk górniczych w funkcji czasu i wysokości piętrzenia oraz określenie czasu zatapiania kopalni. Wyprowadzone wzory opierają się na równaniu bilansowym uwzględniającym po stronie przychodu dopływ wody do zatapianej kopalni z otaczającego górotworu pochodzący z rozciętych wyrobiskami warstw wodonośnych, a po stronie rozchodu wodę dopływającą do zrobów zużywaną na wypełnianie pustych przestrzeni w górotworze oraz zachodzący równocześnie ubytek wody zgromadzonej w zrobach na skutek nieszczelności filarów granicznych w sąsiedztwie czynnych kopalń.

Metoda może być stosowana do oceny czasu zatapiania zrobów likwidowanej kopalni w obrębie wydzielonych stref głębokościowych oraz oceny czasu niezbędnego dla samozatopienia kopalni, licząc od chwili wyłączenia urządzeń odwadniających do ustabilizowania się warunków hydrodynamicznych w jej otoczeniu. Wzory (5), (6), (9) i (10) umożliwiają ocenę zmian wielkości dopływu w okresie zatapiania kopalni, a wzory (15), (16) i (17) ocenę przebiegu zatapiania zrobów w czasie. Na podstawie równań (11) i (12) można wyznaczyć maksymalną wysokość piętrzenia wody w zrobach zatapianej kopalni, w zależności od natężenia filtracji wody przez filary graniczne, w przypadku pośrednich kontaktów hydraulicznych z kopalniami sąsiednimi.

Podstawą stosowania przedstawionej metodyki jest rozpoznanie układu hydrogeologicznego i stanu zawodnienia likwidowanej kopalni z okresu jej czynnej działalności, a w

szczególności dopływów wody na poszczególnych poziomach i udziału w dopływie do kopalni wód infiltrujących z nadkładu, oraz rozpoznanie przepuszczalności górotworu w obrębie filarów granicznych.

## LITERATURA

1. Drzęzła B., Cempiel E., Kozyra J., Szewczyk S. i inni: Ocena zmian warunków hydrogeologicznych wynikających z procesu likwidacji KWK Gliwice z uwzględnieniem wpływów na sąsiednie zakłady górnicze oraz na warunki hydrogeologiczne wód podziemnych, w tym ujęć wód pitnych oraz wód powierzchniowych. Gliwice 1999 (praca nie publikowana).
2. Pazdro Z. Kozerski A.: Hydrogeologia ogólna. Wyd. Geologiczne, Warszawa 1990.
3. Rogoż M.: Pojemność wodna zrobów w kopalniach węgla kamiennego. Prace GIG, Komunikat nr 628. Katowice 1974.
4. Rogoż M. (red): Poradnik hydrogeologa w kopalni węgla kamiennego. Wyd. Śląsk, Katowice 1987.
5. Rogoż M., Posyłek E.: Zasady i kryteria oceny zagrożenia wodnego związanego z likwidacją kopalń. Przegląd Górniczy nr 10/1993, s. 27-32.
6. Rogoż M., Posyłek E.: Konsekwencje hydrogeologiczne likwidacji kopalń węgla kamiennego. Przegląd Górniczy nr 4/1995, s. 27-32.
7. Rogoż M.: Wpływ likwidacji kopalń na środowisko wód podziemnych i powierzchniowych. Archiwum Górnictwa, vol. 41, z. 1, 1996, s. 105-130.
8. Sztelak J.: Hydrogeologia górnicza, zagrożenia wodne w kopalniach podziemnych i sposoby ich zwalczania. Skr. 2080 Wyd. Politechniki Śląskiej, Gliwice 1998.
9. Turek J.(red): Poradnik hydrogeologa. Wyd. Geologiczne, Warszawa 1971.

Recenzent: Dr hab. Henryk Buczek



## Abstract

The paper presents the prediction method of the flooding process of abandoned workings in the liquidated coal mine after the main drainage system has been switched off, which makes it possible to determine some parameters needed to estimate the hydrogeological consequences following the liquidation of coal mines.

Basing on the fundamental laws of underground water hydraulics, analytical equations have been worked out, allowing to determine the intensity of water inflow to the abandoned workings being flooded as the function of time and swelling height, and to determine the time of coal mine flooding. The introduced equations are based on the balance equation which takes into consideration water inflow to the flooded abandoned workings from the surrounding rockmass, and loss of water amassed in abandoned workings taking place simultaneously, due to the leakage of limiting pillars in the vicinity of active coal mines.

This method can be applied for the estimation off flooding time of abandoned workings of the liquidated coal mine with respect to definite depth zones, and for the estimation of time needed to effect self-flooding of a coal mine. The equation (5), (6), (9) and (10) make it possible to estimate changes in water inflow while flooding the coal mine, and the equation (15), (16) and (17) to estimate the flooding process of abandoned workings in time. Basing on the equations (11) and (12), the maximum water swell in abandoned workings of the flooded coal mine can be determined, depending on the intensity of water filtration through limiting pillars, in the case of indirect hydraulic contacts with the neighbouring coal mines.

The presented method can be applied after the hydrogeological condition and water level in the liquidated coal mine from the time it was worked have been determined, and in particular the scope of water inflow at particular seams as well as the share of water infiltration from overburden in the inflow to the coal mine, and after determining rockmass leakage in the vicinity of limiting pillars.