

mgr inż. Janusz Michał Filipczyk^{1)*}
 mgr inż. Jakub Czajkowski²⁾
 ORCID: 0000-0001-9876-9114
 mgr inż. Jindřich Hajda³⁾
 mgr inż. Dawid Kędzia³⁾
 mgr inż. Paweł Dorada³⁾
 prof. dr hab. inż. Artur Radecki-Pawlik³⁾
 ORCID: 0000-0002-1485-9284
 Martyna Brusik³⁾
 inż. Jolanta Rówińska³⁾
 inż. Kamil Kosiek³⁾

DOI: 10.15199/33.2022.10.11

Streszczenie. W artykule przedstawiono możliwości wykorzystania modelu BIM w hydrotechnice na przykładzie istniejącej Elektrowni Wodnej na Dolnym Śląsku. Technologia BIM umożliwia opracowanie cyfrowych danych, które ułatwiają proces projektowania, koordynacji projektami oraz szybką wymianę danych. Do wykonania remontu Elektrowni Wodnej wykorzystany został program Allplan BIM, za pomocą którego stworzono kompleksowy model zawierający budynek elektrowni, kanał wlotowy wraz z ukształtowaniem spirali i kanał wylotowy oraz sąsiadujący z elektrownią budynek mieszkalny. Ukształtowanie przestrzenne elektrowni w BIM posłużyło do analizy hydraulicznej sprawności turbiny, która została wykonana w technologii CFD oraz usprawniła opracowanie projektu naprawczego.

Słowa kluczowe: technologia BIM; Elektrownia Wodna; modelowanie CFD.

Technologia BIM (ang. *Building Information Modeling*) jest technologią sporządzania projektów, która umożliwia wykonywanie kompleksowych modeli przestrzennych obiektów budowlanych, m.in. obiektów hydrotechnicznych. Ich cechą charakterystyczną jest złożoność układów funkcjonalnych, co wiąże się z tym, że projekty hydrotechniczne są multidyscyplinarne. W tworzenie obiektów hydrotechnicznych są zaangażowane branże: architektoniczna (budynki, magazyny, hale maszyn itp.); konstrukcyjno-hydrotechniczna (konstrukcje oporowe, jak ściany zapór, mury nabrzeży, kanały wlotowe w elektrowniach ze spiralami, filary jazów, rurociągi); mechaniczna (zamknięcia hydrotechniczne, turbiny, siłowniki, silniki napędów itp.); sanitarna (wyposażenie obiektów hydrotechnicznych w wodę oraz odprowadzenie nieczystości); elektryczna (transformatory, instalacje oświetleniowe, trasy kablowe); mechatroniczna (automatyczna instalacja rejestrująca w systemie ciągłym stan budowl). Bardzo ważna jest poprawna wymiana informacji między tymi branżami, aby uniknąć kolizji na etapie wykonawstwa danego projektu.

Technologia BIM umożliwia koordynację tej współpracy podczas procesu projektowego, wykonawczego oraz po zakończeniu inwestycji. Tworzenie cyfrowego bliźniaka, czyli elektronicznej kopii odzwierciedlającej obiekt w rzeczywisto-

¹⁾ PBW INŻYNIERIA Sp. z o.o.

²⁾ Politechnika Wrocławska, Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego

³⁾ Politechnika Krakowska, Wydział Inżynierii Lądowej

*) Adres do korespondencji: janusz.filipczyk@pbwinzynieria.pl

Innowacyjność wykorzystania technologii BIM w hydrotechnice

BIM innovative technology in hydraulic engineering

Abstract. The paper presents BIM technology and CDF model which were applied in hydraulic engineering studies. As a practical example a Hydroelectric Power Plant located in Lower Silesia was chosen. BIM technology enables the elaboration of digital data which facilitates the design process, project coordination and data editing. For the renovation of the Hydroelectric Power Plant Allplan BIM software was used, with which a comprehensive model was created including: a powerplant building, an inlet channel with the spiral configuration, an exit channel and a residential building. Spatial configuration of the Power Plant in was used for hydraulic analysis of the efficiency of a turbine created in CFD technology. Finally, it was proved and showed in the paper that using BIM technology and CDF model improved and speeded up the renovation project.

Keywords: BIM technology; Hydroelectric Power Plant; CFD model.

ści, ułatwi w przyszłości lepsze użytkowanie obiektu dzięki informacji o zamontowanych podzespołach. Modele BIM integrują wszystkie niezbędne dane na temat zastosowanych materiałów, urządzeń czy instalacji. Technologia BIM bardzo szybko rozwija się na rynku obiektów kubaturowych, ponieważ jest w stanie kompleksowo oraz na bieżąco koordynować proces projektowania i budowy, aby uniknąć błędów.

Zastosowanie BIM w hydrotechnice

Światową tendencją jest wdrożenie standardów BIM w procesie projektowania zgodnie z odpowiednimi wytycznymi. W wielu krajach istnieje obligatoryjne wymaganie sporządzania projektów w technologii BIM w przypadku zamówień publicznych. W tych rozwiązaniach przoduje Norwegia oraz Wielka Brytania. Rząd Norwegii już w 2016 r. podjął decyzję, że w przypadku rządowych zamówień publicznych projekty muszą być wykonywane w technologii BIM. W Polsce jesteśmy obecnie na etapie wdrażania jednolitych standardów projektowania w technologii BIM. Prace nad jej wprowadzeniem w hydrotechnice trwają już kilka lat. Jeden z pierwszych projektów w hydrotechnice w technologii BIM powstał w Polsce w 2011 r. Wykonał go zespół Hydroprojektu Kraków, a dotyczył „Modernizacji zbiornika wodnego Nysa w zakresie bezpieczeństwa przeciwpowodziowego – etap I. Przedsięwzięcie: Przebudowa i udrożnienie przeciwpowodziowe rzeki Nysy Kłodzkiej od zbiornika wodnego Nysa (km 65 + 100) do rejonu Kubiec (km 55 + 500) wraz z istniejącymi budowlami”. Zastosowano w nim oprogramowanie AutoCAD Civil 3D

do budowy modelu przestrzennego wałów przeciwpowodziowych, chroniących miasto Nysa. Połączono w ten sposób informacje pozyskane z pomiarów geodezyjnych z obliczeniami hydraulicznymi wykonanymi w programie HEC-RAS.

Na podstawie obliczeń hydraulicznych wyznaczono bezpieczne wzniesienie korony wałów przeciwpowodziowych. Informację tę zaimplementowano jako niweletę, tworząc model wałów w technologii BIM. Przyspieszyło to proces projektowy, generując wielokilometrowe profile, realne zasięgi skarp oraz ułatwiło zarządzanie materiałem na etapie budowy przez dokładne sporządzenie bilansu mas ziemnych. Późniejszy rozwój technologii umożliwił przyspieszenie procesu wdrażania w Polsce BIM w hydrotechnice, ale większość projektów było skoncentrowanych na budowach liniowych typu wały lub zapory ziemne. Od niedawna zaczęto stosować technologię BIM w hydrotechnice w przypadku obiektów punktowych, takich jak stopnie wodne, śluzy żeglugowe czy modernizacje elektrowni wodnych. Jednym z przykładów jest niedawno realizowany projekt regulacji koryta Odry poniżej stopnia wodnego Januszkowice, opracowany przez PBW INŻYNIERIA Sp. z o.o. Wrocław [1].

W artykule skupiliśmy się na wdrożeniu technologii BIM za pomocą programu Allplan BIM.

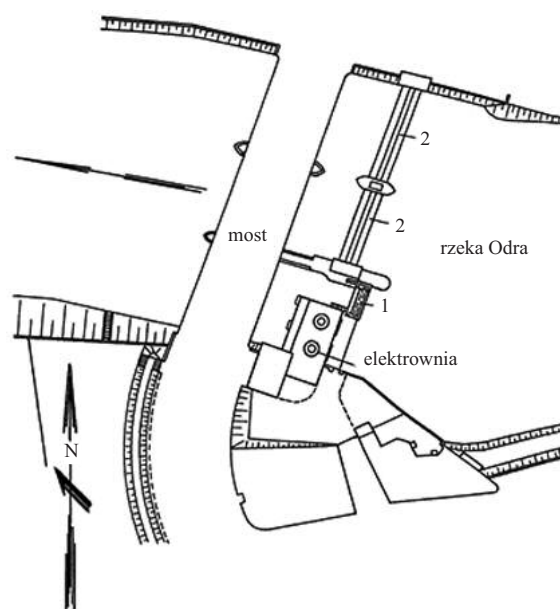
Elektrownia Wodna na Dolnym Śląsku

Przedmiotem wdrożenia modelu BIM był zespół obiektów hydrotechnicznych elektrowni wodnej zlokalizowanej na Dolnym Śląsku. Jest to elektrownia przepływowa usytuowana na lewym brzegu Odry. Budowę elektrowni rozpoczęto 15 marca 1924 r., wyburzając wcześniej budynki spalnego młyna i jego rynien roboczych, a zakończono w 1925 r. Natomiast oficjalnie przekazano elektrownię władzom miasta 26 stycznia 1926 r. Jej budynek usytuowany jest pomiędzy mostami tworzącymi przedłużenie piętrzenia wytworzonego przez jaz kłapowy. Woda do turbin jest doprowadzana kanałem dopływowym wyodrębnionym od strony lewego brzegu rzeki. Na końcu kanału dopływowego, za kratami i wlotem do turbin, usytuowane są remontowe zamknięcia zasuwowe.

Stopień wodny (rysunek 1) składa się z następujących podstawowych elementów:

- budynku elektrowni wodnej;
- jazu kłapowego;
- upustu płuczącego (pomiędzy jazem i budynkiem elektrowni);
- murów oporowych (wraz z kanałem dopływowym i odpływowym elektrowni);
- budynku mieszkalnego;
- terenu przynależnego do elektrowni.

Budynek elektrowni wodnej wraz z dwoma turbozespołami usytuowany jest na lewym brzegu stopnia wodnego. Pomiędzy filarem działowym jazu kłapowego a ścianą północną budynku elektrowni zlokalizowano upust płuczający, który bierze również udział w przepuszczaniu wód powodziowych. W skład budowli wchodzi: budynek hali maszyn – jedna kondygnacja i blok siłowy stanowiący część podwodną elektrowni. Konstrukcja budynku w części naziemnej jest wykonana



Oznaczenia: 1 – spust płuczający; 2 – jaz kłapowy

Rys. 1. Plan sytuacyjny stopnia wodnego Opracowanie autorów
Fig. 1. Situational plan of the hydraulic structure Authors' compilation

jako ramowa z wypełnieniem ścian cegłą. Blok fundamentowy wraz z halą maszyn został wykonany w postaci jednej, monolitycznej części z wyjątkiem ściany południowej z przyległym odcinkiem hali maszyn długości 1 m, wychodzącym z obrysu fundamentów elektrowni. Ta część hali maszyn ma własny fundament posadowiony na rzędnej 112,7 m n.p.m. NN, połączony na wpust z blokiem fundamentowym elektrowni. W strefie wahań zwierciadła wody ściana zachodnia i północna, łącznie z filarkami wlotowymi, ma okładzinę z kamienia do rzędnej 114,28 m n.p.m. NN. Stropodach hali maszyn wykonano w konstrukcji żelbetowej, na którym położono pokrycie z papy. Fundamenty budynku elektrowni sięgają rzędnej ok. 103,80 m n.p.m. NN. Na wlocie są oparte na ścianie szczelnej zabitej do warstwy nieprzepuszczalnej gruntu do rzędnej ok. 103,00 m n.p.m. NN, podobnie jak od strony dolnej wody, gdzie ścianki zabito do rzędnej ok. 103,30 m n.p.m. NN. Na żelbetowy blok fundamentowy składają się: płyta fundamentowa; wloty; spirale wlotowe; rury ssące; komory turbin; pomost czyszczarki krat; strop maszynowni (hala maszyn); pomieszczenia gospodarczo-magazynowe; korytarze kablowe. Komory turbinowe zamykane są płaskimi zasuwami drewnianymi z napędem ręcznym. Wloty do tych komór zabezpieczają kraty stalowe.

W elektrowni zabudowane są dwa turbozespoły (fotografia), wyposażone w jednakowe generatory synchroniczne, bezpośrednio sprzężone z turbinami Francis o osiach pionowych. **Dane techniczne elektrowni** są następujące:

- wloty do turbin: światło $2 \cdot 6,50 = 13,0$ m;
- wyloty z turbin: światło $2 \cdot 6,00 = 12,0$ m;
- długość bloku siłowni 23,285 m;
- szerokość bloku siłowni 22,80 m;
- wysokość hali maszyn (od posadzki) 9,81 m.

Dane znamionowe turbiny turbozespołu są następujące: typ Francis; rok budowy – 1921.



Generatory znajdujące się w hali maszyn budynku elektrowni

Fot. autorzy

Generators located in the machine room of the Power Plant building

Photo authors'

Model BIM elektrowni

Numeryczny model 3D odzwierciedlający stan istniejący powstał na podstawie pomiarów geodezyjnych oraz dokumentacji archiwalnej udostępnionej przez zarządcę obiektu (rysunki 2 i 3). Jednym z powodów powstania modelu w technologii BIM było naniesienie zaobserwowanych uszkodzeń budynków elektrowni oraz odkształceń stopnia wodnego podczas przeprowadzania inwentaryzacji stanu istniejącego. Powstały model stanu istniejącego został wykorzystany do określenia zakresu niezbędnych prac remontowych, a w kolejnym etapie do poprawnego zaprojektowania modernizacji elektrowni.

Podczas przeprowadzania oceny stanu technicznego całego kompleksu elektrowni stwierdzono, że na elewacji frontowej budynku mieszkalnego znajdują się pęknięcia poziome w miejscach zamontowania ściągów. Po dokładnej analizie dokumentacji archiwalnej zauważono duże wartości przemieszczeń na reperach zamontowanych na budynkach elektrowni. W związku z tym przeprowadzono kompleksowe obliczenia, które stanowiły podstawę do zaprojektowania odpowiedniego wzmocnienia fundamentów budynku elektrowni oraz przylegającego budynku mieszkalnego. W celu uniknięcia przeprowadzania inwazyjnych robót zaproponowano wzmocnienie posadowienia w postaci mikropali. Utworzony model 3D umożliwił

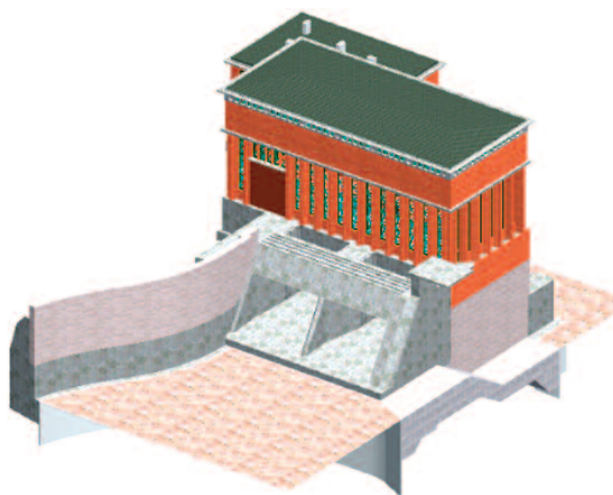


Rys. 2. Widok od strony wody dolnej na elektrownię – model wykonany w programie Allplan BIM

Opracowanie autorów

Fig. 2. Downstream view of the Power Plant – Allplan BIM model

Authors' compilation



Rys. 3. Widok od strony wody górnej na elektrownię – model wykonany w programie Allplan BIM

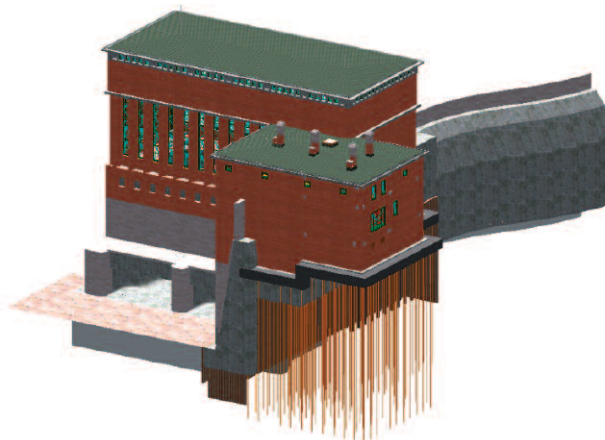
Opracowanie autorów

Fig. 3. Upstream view of the Power Plant – Allplan BIM model

Authors' compilation

wił przestrzenne rozłożenie odwiertów wraz z ich lokalizacją, co pozwoliło na uniknięcie kolizji projektowanych mikropali z istniejącymi elementami budynku. Na rysunkach 4 i 5 przedstawiono widok modelu wraz z zastosowanymi mikropalami.

W budynkach zabytkowych, jednym z trudniejszych zadań jest poprowadzenie nowych sieci instalacyjnych w taki sposób, aby uniknąć kolizji z ważnymi elementami konstrukcyjnymi budynku oraz istniejącymi sieciami energetycznymi, wodociągowymi, czy kanalizacyjnymi. W przypadku opisywanej elektrowni wodnej zaproponowano przeniesienie rozdzielni z budynku hali maszyn do przyległego budynku mieszkalnego. Dzięki modelowi 3D, stworzonemu w programie Allplan BIM, została zaprojektowana nowa trasa kabli energetycznych, która pozwoliła na ominięcie ważnych elementów wzmocnienia zabytkowego budynku oraz istniejących sieci. Na rysunku 6 przedstawiono sposób poprowadzenia trasy sieci kabli energetycznych łączącej zaprojektowaną rozdzielnię w budynku mieszkalnym z turbozespołami znajdującymi się w hali maszyn.

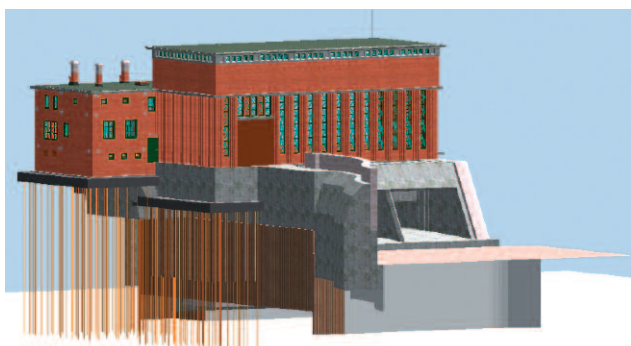


Rys. 4. Wzmocnienie fundamentów budynków (widok od strony wody dolnej) – model wykonany w programie Allplan BIM

Opracowanie autorów

Fig. 4. Foundations strengthening of buildings (downstream view) – Allplan BIM model

Authors' compilation

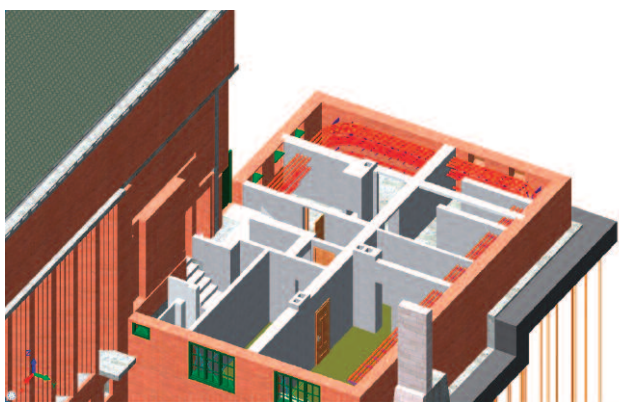


Rys. 5. Wzmocnienie fundamentów budynków (widok od strony wody górnej) – model wykonany w programie Allplan BIM

Opracowanie autorów

Fig. 5. Foundations strengthening of buildings (upstream view) – Allplan BIM model

Authors' compilation



Rys. 6. Projekt poprowadzenia nowej trasy kabli energetycznych w budynku mieszkalnym stworzony w modelu 3D za pomocą programu Allplan BIM

Opracowanie autorów

Fig. 6. A new route of power cables in a residential building created in a 3D model using the Allplan BIM model

Authors' compilation

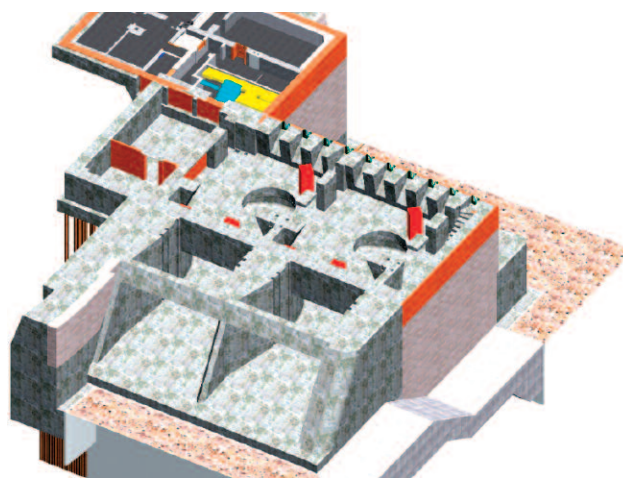
Przeniesienie rozdzielni do budynku mieszkalnego wygenerowało nowy problem projektowy, jakim była wymiana stropu nad piwnicą z odcinkowego na monolityczny. Utworzony wcześniej model 3D budynku mieszkalnego posłużył do przeprowadzenia analizy statycznej wytrzymałości istniejącego stropu pod ciężarem nowo zaprojektowanych szaf rozdzielczych w odrębnym oprogramowaniu MES. W ten sposób sprawdzono ugięcia i stan naprężeń, a następnie zaproponowano wymianę stropu. Zastosowanie technologii BIM ułatwiło wykonanie rysunków stanu projektowanego remontu, rozplanowanie nowych elementów oraz określenie ilości niezbędnych materiałów, co z kolei pozwoliło na sprawniejsze opracowanie przedmiaru oraz kosztorysu.

Obliczenia hydrauliczne wydatku elektrowni wodnej. Modelowanie CFD

Jednym z trudniejszych elementów do weryfikacji w istniejących elektrowniach wodnych jest określenie sposobów przepływu wody przez kanały dolotowe, turbiny wodne, spirale oraz rurę ssącą. W tym celu wykonuje się modele numeryczne metodą CFD (ang. *Computational Fluid Dynamics*). Inżynier ma do wykorzystania bardzo potężne narzędzie do projektowania oraz analizy zachodzących zjawisk w korycie rzecz-

nym oraz budowli przegradzającej naturalne koryto rzeczne. Programy umożliwiają obliczenie podstawowych wielkości fizycznych, takich jak przepływ, prędkość w trzech kierunkach, napętnienie, liczba Freuda, temperatura, wywieranie ciśnienia na elementy konstrukcyjne w wyniku przepływu cieczy. Jednym z największych osiągnięć algorytmu CFD jest odwzorowanie swobodnego zwierciadła powierzchni wody oraz linii prądu strugi i naprężeń, które wywołuje przepływający płyn, co pozwala na określenie ryzyka wystąpienia takich niekorzystnych zjawisk, jak kawitacja czy rozmycie dna koryta.

W celu stworzenia modelu CFD niezbędne jest dokładne odwzorowanie trójwymiarowej geometrii obiektu. W tym celu można wykorzystać model geometrii 3D stworzony np. w programie Allplan BIM. Taki model został stworzony na potrzeby projektu remontu elektrowni, modernizacji turbozespołów, spirali, rur ssących oraz kanałów dolotowych (rysunek 7).



Rys. 7. Wlot do kanału dolotowego modernizowanej elektrowni – model wykonany w programie Allplan BIM

Opracowanie autorów

Fig. 7. The inlet channel of the modernized Power Plant – Allplan BIM model

Authors' compilation

Podstawowe wzory oraz terminy używane w metodzie CFD

Większość programów, które są obecnie stosowane do modelowania CFD, rozwiązuje problemy przepływu płynów w modelach 3D. Opracowane zostały z wykorzystaniem dwóch podstawowych równań opisujących ruch cieczy nieidealnej, nieściśliwej. Pierwsze, to równanie ciągłości przepływu mające postać [2]:

$$\left(\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) = 0$$

Drugie równanie, wyrażające równowagę sił, nazywane jest równaniem Naviera – Stokesa (N-S). Po raz pierwszy sformułowane przez C. L. Naviera w 1827 r., popularnie nazywane jest metodą N-S. Ma ono postać [3]:

$$\frac{\partial(\rho \mathbf{u})}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla)(\rho \mathbf{u}) = -\nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{u} + \rho \mathbf{b}$$

gdzie:

$\mathbf{u} = u_1 \cdot \mathbf{e}_1 + u_2 \cdot \mathbf{e}_2 + u_3 \cdot \mathbf{e}_3$ – wektor prędkości przepływu;

e_1, e_2, e_3 – jednostkowy wektor bazowy;
 t – czas;
 ρ – gęstość płynu;
 p – ciśnienie;
 μ – lepkość dynamiczna;
 b – wektor siły masowej.

Turbulencja przepływu to jedno ze zjawisk uwzględnianych w obliczeniach, które wpływa na przepływ wody przez elektrownię. Wiele zjawisk przyrodniczych związanych jest z występowaniem turbulencji, np. ruch wody w morzach i oceanach, ruch powietrza, huragany, przepływ w korytach otwartych, rzekach, powstawanie wirów i odskoków hydraulicznych, a także woda spadająca z wodospadu.

Zastosowany program do obliczeń numerycznych wykonuje obliczenia przepływu cieczy w 3D, z wykorzystaniem równania Naviera – Stokesa, które oprócz podstawowych członów zawiera również człony turbulencje oraz tensor naprężenia Reynoldsa. W celu wykonania obliczeń, modelowanie CFD wykorzystuje modele turbulencje, aby opisać zachodzące zjawisko turbulencji, które powstaje podczas przepływu turbulencje. Zadaniem modeli turbulencyjnych jest uogólnienie równania N–S.

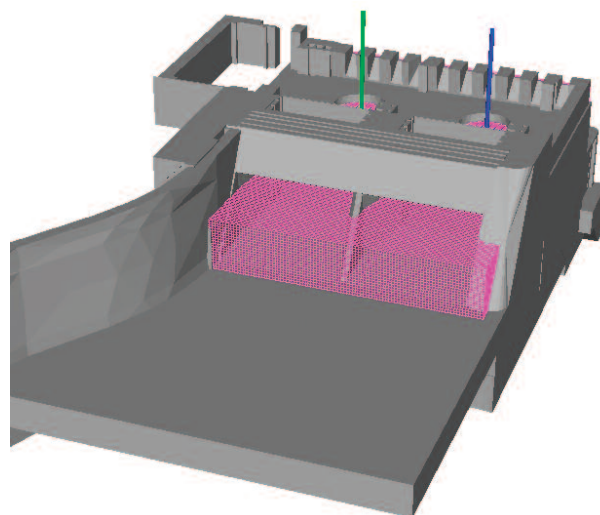
Podstawowym zjawiskiem podczas przepływów turbulencyjnych jest złożony ruch wirowy i związane z nim występowanie wirów, które zależą od lepkości cieczy oraz od dyssypacji energii. Zjawisko to dotyczy również analizy elektrowni. W naszym modelowaniu CFD elektrowni został użyty model turbulencyjny RANS (ang. *Reynolds Averaged Navier – Stokes equations*), czyli model uśredniania Reynoldsa [4]. Model RANS w przypadku płynów jednorodnych i nieściśliwych oznacza $p = \bar{p} = const.$, $\mu = const.$ Stosując hipotezę Reynoldsa i uśrednienie czasowe, w wyniku podstawienia do równania ciągłości przepływu otrzymujemy równanie opisujące średnią wartość wektora prędkości.

Nowe równania domykają model Reynoldsa i mogą się różnić między sobą. Tworzą one rodzinę modeli RANS (*Reynolds Averaged Navier – Stokes equations*). Modele RANS można stosować przy obliczeniach CFD obiektów o wielkiej skali. Przy zastosowaniu modelu nie jest konieczne generowanie gęstej siatki obliczeniowej. Powoduje to zmniejszenie liczby komórek obliczeniowych oraz przyspieszenie obliczeń. Modele RANS wykorzystywane są często przy obliczeniach budowli hydrotechnicznych. Możliwość zastosowania modelu do płynów ściśliwych i nieściśliwych powoduje, że można modelować przepływy dwufazowe, jak przepływ wody i powietrza. Jest to najlepszy model do obliczeń inżynierskich związanych z wymiarowaniem budowli hydrotechnicznych. W przypadku zastosowania modelu RANS otrzymane wyniki nie odbiegają znacznie od rzeczywistości. Można to zauważyć, przeglądając wyniki takie, jak rozkład prędkości oraz zobrazowanie linii prądów cząstki wody przepływającej przez budowlę hydrotechniczną [5, 6]. Model RANS ma swoje ograniczenia spowodowane znacznym uproszczeniem. Nie jest stosowany przy obliczeniach numerycznych, w których ważne jest określenie wielkości zaburzenia wynikającego z przepływu turbulencyjnego oraz zobrazowanie powstałych wirów.

Programy typu CFD umożliwiają rozwiązywanie wielu problemów hydrotechnicznych, takich jak np. poprawny dobór parametrów obiektów hydrotechnicznych, wylotów, ubezpie-

czeń dna cieku przed nadmiernym rozmyciem poniżej budowli przegradzających koryto rzeki, a także symulację zjawisk zachodzących w korycie rzecznej, których przyczyna powstania jest nie do końca znana lub trudna do wyznaczenia wzorami empirycznymi.

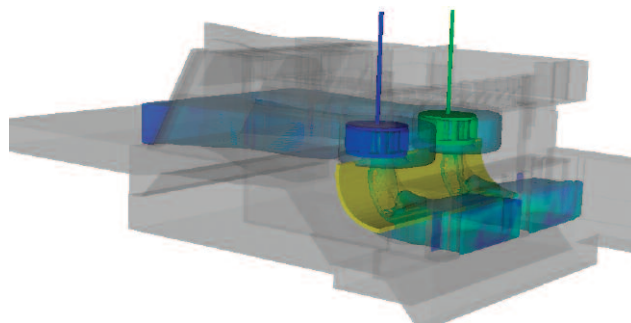
Podstawą modelowania elektrowni jest wyznaczenie rozkładu ciśnienia hydrodynamicznego oraz prędkości wody na odpływie (rysunki 8 i 9). Model CFD powstał na podstawie modelu elektrowni wykonanego w technologii BIM. Model hydrauliczny 3D składa się z kanałów doprowadzających, spirali, turbin oraz rur ssących i wylotów. Zamodelowanie tak skomplikowanej geometrii miało na celu uwzględnienie złożoności przepływu oraz określenie wpływu odskoku hydraulicznego na prędkość przepływającej wody. W celu odzwierciedlenia zjawiska turbulencji wykorzystano model turbulencyjny RANS. W modelu uwzględniono także szorstkość elementów opływanych przez wodę. Natomiast, chcąc odzwierciedlić poprawnie jej przepływ przez blok elektrowni wraz kanałami dolotowymi, spiralą, turbiną oraz rurą ssącą, zastosowano zmienne oczko siatki obliczeniowej, dostosowując wielkość oczka obliczeniowego do badanego elementu budowli hydrotechnicznej.



Rys. 8. Model elektrowni wraz z elementami siatki

Opracowanie autorów

Fig. 8. Power Plant model view with mesh elements Authors' compilation



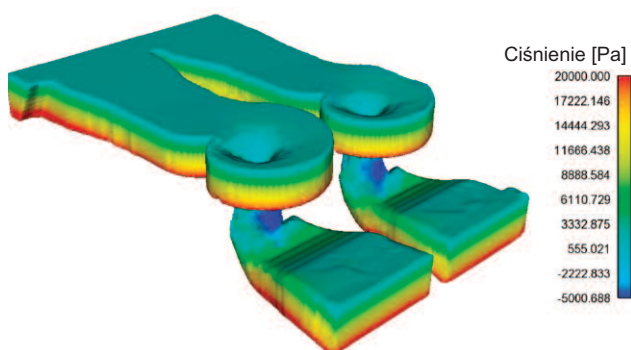
Rys. 9. Model CFD kanałów doprowadzających, spirali, turbin oraz rur ssących wykonany na podstawie modelu w technologii BIM

Opracowanie autorów

Fig. 9. CFD model view of supply channels, spiral, turbines and suction pipes based on the model made in BIM technology Authors' compilation

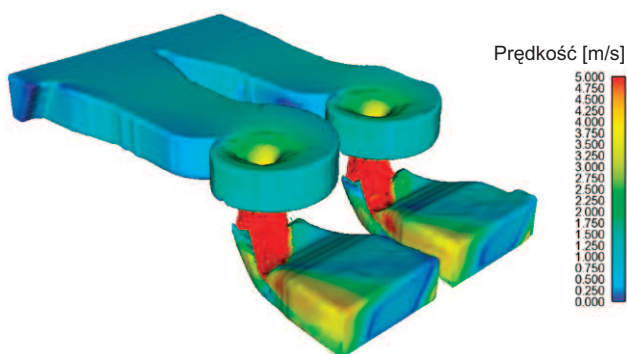
Wyniki przeprowadzonych obliczeń numerycznych

W wyniku modelowania hydraulicznego elektrowni wodnej otrzymano przestrzenny rozkład wyników. Jednym z analizowanych parametrów wpływających na trwałość konstrukcji oraz prawidłową pracę obiektu jest ciśnienie, wywołane wodą przepływającą przez układ hydrauliczny elektrowni. Ciśnienie to oddziałuje na ściany budowli oraz obciąża wirnik turbiny (rysunek 10). Jednym z kluczowych elementów weryfikacji otrzymanych wyników było poszukiwanie miejsc, w których możliwe jest powstawanie zjawiska kawitacji, które szczególnie negatywnie wpływa na trwałość elementów mechanicznych elektrowni. Należy zwrócić uwagę, że obliczony rozkład ciśnienia nie wykazał ryzyka powstawania kawitacji podczas normalnego stanu eksploatacji elektrowni.



Rys. 10. Przestrzenny rozkład ciśnienia obciążającego turbinę elektrowni – model numeryczny CFD
Fig. 10. Spatial distribution of pressures loading the turbine of a Power Plant – numerical CFD model
 Opracowanie autorów
 Authors' compilation

Kolejnym istotnym parametrem uzyskanym z przeprowadzonego modelowania jest rozkład prędkości przepływu wody. Jest to parametr, na podstawie którego można określić, czy układ hydrauliczny obiektu działa poprawnie. Z rysunku 11 wynika, że wraz ze zbliżaniem się do osi turbiny zwiększa się prędkość przepływającej wody. Jest to zjawisko prawidłowe, które świadczy o poprawnym działaniu układu hydraulicznego elektrowni. Na podstawie wyznaczonego rozkładu prędkości możliwe było również wyznaczenie



Rys. 11. Rozkład prędkości – model numeryczny CFD
Fig. 11. Velocity distribution – CFD numerical model
 Opracowanie autorów
 Authors' compilation

nie miejsc występowania oraz maksymalnych wartości prędkości przepływającej wody. Należy podkreślić, że otrzymane wyniki nie odbiegają od normy, a maksymalne obliczone prędkości przepływu kształtują się na poziomie ok. 12 m/s. Wartość ta nie przekracza dopuszczalnych dla betonu granicznych prędkości przepływu, które jak podano w [7], wynoszą 19 – 37 m/s. Na rysunkach 10 i 11 przedstawiono wyniki badań modelowych CFD.

Podsumowanie

Zastosowanie technologii BIM w projektach hydrotechnicznych usprawnia oraz znacznie przyspiesza proces projektowania, tworząc powiązane ze sobą rysunki wszystkich branż. Ułatwiło nam to kontrolę nad procesem tworzenia dokumentacji, niwelując możliwości powstania kolizji na późniejszym etapie realizacji projektu. Jednym z dodatkowych plusów zastosowania technologii BIM podczas projektowania jest możliwość wykorzystania stworzonego modelu BIM do dokładnych obliczeń hydraulicznych projektowanych elementów lub weryfikacji poprawności ich działania.

Podczas analizy wyników obliczeń hydraulicznych zauważono, że największa prędkość występuje na początku wyjścia wody z turbiny, na odcinku rury ssawnej. W tym miejscu występuje też największa różnica ciśnień. Podczas wykonywanej inwentaryzacji podwodnej dokonano wnikliwej analizy miejsc narażonych na uszkodzenia, wskazanych w obliczeniach hydraulicznych. W wyniku przeprowadzonych obliczeń CFD określono, że maksymalna prędkość wody wynosząca 12 m/s nie przekracza granicy prędkości dopuszczalnej w przypadku betonu, czyli 19 – 37 m/s wg [7]. Obliczenia numeryczne CFD sporządzone na podstawie modelu BIM wykazały, że układ hydrauliczny elektrowni działa poprawnie. Wyniki analizy zostały potwierdzone podczas inwentaryzacji podwodnej.

Literatura

- [1] Filipczyk J, Mokwa M, Kędzia D, Krasodomski J, Dorada P, Radecki-Pawlik A. Badania numeryczne języka rozdzielczego. *Gospodarka Wodna*. 2022; 6. Wydawnictwo SIGMA-NOT. Warszawa.
- [2] Kubrak J. *Hydraulika Techniczna*. 1998. Wydawnictwo SGGW, Warszawa.
- [3] Flaga A, Błazik-Borowa E, Podgórski J. *Aerodynamika smukłych budowli i konstrukcji prętowych – ciągnowych*. 2004. Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej.
- [4] Elsner J. *Turbulencja przepływów*. 1987. PWN, Warszawa.
- [5] Gorczyca E, Radecki-Pawlik A, Krzemień K. redaktorzy. *Procesy fluwialne a utrzymanie rzek i potoków górskich*. Instytut Geografii i Gospodarki Przestrzennej UJ, Kraków, 2021, s.: 257 – 286. Filipczyk JM, Radecki-Pawlik A. *Możliwości wykorzystania modelowania numerycznego z udziałem modeli CFD w utrzymaniu koryt rzecznych oraz projektowaniu budowli hydrotechnicznych*.
- [6] Winter J, Wity A, Popielski P, Sieński E. redaktorzy. *Bezpieczeństwo Budowli Hydrotechnicznych*. Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej Państwowy Instytut Badawczy. Warszawa, 2021 s.: 46 – 56. Filipczyk J, Dorada P, Kędzia D, Pietruszewski B, Czajkowski J. *Modelowanie CFD jako optymalna metoda wymiarowania zamknięcia klapowego na przykładzie jazu na Stopniu Wodnym Ujście Nysy*.
- [7] Wołoszyn J, Czamara W, Eliasiewicz R, Krężel J. *Regulacja rzek i potoków*. 1994. Wydaw. Akademii Rolniczej we Wrocławiu.

Przyjęto do druku: 19.09.2022 r.