Badania podłoża i analiza numeryczna posadowienia chłodni kominowej bloku energetycznego o mocy 910 MW w Elektrowni Jaworzno III – Elektrownia II

Dr inż. Mariusz Biały, Politechnika Śląska w Gliwicach

1. Wprowadzenie

Chłodnie kominowe o ciągu naturalnym pełnią funkcję wymienników ciepła pracujących w obiegu zamkniętym, służących do chłodzenia wód przemysłowych głównie w elektrowniach, zakładach azotowych i rafineriach. Podgrzana w wymienniku ciepła woda jest pompowana rurami na poziom instalacji wodorodziału, umiejscowionych w dolnej części płaszcza chłodni powyżej okien wlotowych, skąd po rozdrobnieniu na talerzykach rozpryskowych trafia na zraszalnik. Spływając cieńkim „filmem" po powierzchniach elementów zraszalnika ochładzana jest strumieniem powietrza, które wpada oknami wlotowymi i przepływa kominem chłodni od dołu do góry – aż do poziomu górnej galerii. Opadająca woda gromadzi się w zbiorniku o głębokości 2 m zlokalizowanym pod zraszalnikiem, skąd rurociągami jest transportowana do maszynowni, a po ogrzaniu powraca do chłodni. Wydajność chłodni o ciągu naturalnym zależna jest głównie od jej wysokości, geometrii powłoki i powierzchni kontaktu ochładzanej wody z powietrzem. Planowany w Elektrowni Jaworzno III – Elektrownia II nowy blok energetyczny o mocy 910 MW wymagał uruchomienia chłodni o wydajności chłodzenia 890 MW. Taka duża wydajność wymagała zaprojektowania chłodni o wysokości 181,5 m. Średnica hiperboloidalnej powłoki na poziomie okna wlotowego wynosi 130 m, w talii 82,2 m, a na poziomie wylotu 85,22 m. Okna wlotowe umieszczone były na poziomie 12,5 m. Powłoka jest oparta na 40 prefabrykowanych żelbetowych słupach zwężających się ku górze, osiągających na poziomie oparcia dolnej krawędzi płaszcza szerokość 1 m. Grubość powłoki zmienia się od 1,05 m w miejscu oparcia na słupach do 0,2 m na wysokości 75 m i utrzymuje się tak do 174,4 m, gdzie ponownie jest pogrubiona, aż osiąga na poziomie wylotu 0,3 m. Budowla spoczywa na fundamencie pierścieniowym o promieniu 69 m. Wysokość przekroju poprzecznego pierścienia wynosi 1,6 m, a szerokość 6,5 m.

Wymiary powłoki, a co za tym idzie fundamentu sprawiają, że powierzchnia kontaktu między pierścieniem a podłożem jest bardzo duża, a więc prawdopodobieństwo występowania pod fundamentem gruntów o różnej podatności zarówno w planie, jak i z głębokością również jest duże. Projektowanie posadowienia chłodni wymaga więc przeprowadzenia serii badań podłoża na dużym obszarze i odpowiedniej głębokości, która wynika z szerokości pierścienia i powstałej pod nim w gruncie strefy aktywnej.

2. Badania i właściwości podłoża gruntowego

Pierwszy etap badań podłoża planowanej dla bloku w Elektrowni Jaworzno III chłodni wykonany przez Zakład Robót Geologiczno-Inżynieryjnych Geotest Tychy obejmował wykonanie pięciu otworów badawczych. W punktach 9, 11 i 12 wiercenia prowadzono do głębokości 25 m, w punkcie 13 do 45 m i w punkcie 10 do 44 m. Na pobranych w trakcie wierceń próbach gruntów niespoistych wykonano analizy sitowe. Ponadto dla piasków określono współczynniki filtracji. W przypadku próbek gruntów spoistych oznaczono wilgotność naturalną i granice konsystencji. Podłoże podzielono na warstwy w oparciu o wydzielenia genetyczne i parametry fizykomechaniczne oraz określono ich parametry na podstawie normy PN-81/B-03020 Grunty budowlane. Posadowienie bezpośrednie budowli. Obliczenia statyczne i projektowanie. W podłożu wydzielono trzy grupy genetyczne. Grunty wydzielone w ramach tych grup, ich stan i moduły ściśliwości podano poniżej. Pierwsza grupa to nasypy o miąższości dochodzącej do 1 m.

Druga grupa to piaski o różnym stopniu zagęszczenia i przewarstwiające je lub zalegające pod nimi warstwy glin, pyłów i iłów, stąd zastosowano podział na podgrupy a i b zależnie od stopnia zagęszczenia lub plastyczności i oszacowano ich moduły ściśliwości na podstawie normy PN-81/B-03020. Podgrupa, gdzie przeważały grunty sypkie, to: piaski średnie w stanie luźnym o I_D=0,3 i M_0=70 000 kPa; piaski średnie z domieszką gliny i piaski średnie na pograniczu drobnych, średniozagęszczone o I_D=0,5 i M_0=100 000 kPa; piaski średnie z domieszką gliny w stanie zagęszczonym o I_D=0,7 i M_0=130 000 kPa; piaski drobne w stanie luźnym o I_D=0,3 i M_0=45 000 kPa; piaski drobne średniozagęszczone o I_D=0,5 i M_0=65 000 kPa; piaski drobne, piaski drobne na pograniczu piasków pylastych, zagęszczone o I_D=0,7 i M_0=100 000 kPa. Podgrupa b zawierająca grunty spoiste to: pyły piaszczyste na pograniczu piasków gliniastych, pyły, gliny pylaste na pograniczu glin

Rys. 1. *Rozmieszczenie punktów wierceń wykonanych w podłożu planowanej chłodni i przekrój przez otwory 9-10-12 wykonany przez ZRG-I Geotest Tychy*

zwięzłych, gliny zwięzłe na pograniczu iłu, gliny zwięzłe, gliny piaszczyste na pograniczu piasków gliniastych oraz gliny na pograniczu pyłów piaszczystych o konsystencji twardoplastycznej i stopniu plastyczności o I_L=0,1 i M_0=37 000 kPa; gliny, piaski gliniaste, pyły oraz gliny pylaste o konsystencji plastycznej o I_L=0,35 i M_0=23 000 kPa; piaski gliniaste i pyły piaszczyste o konsystencji miękkoplastycznej o I_L=0,6 i M_0=12 000 kPa; iły pylaste i iły o konsystencji plastycznej o I_L=0,8 i M_0=32 000 kPa.

Trzecia grupa gruntów została podzielona na dwie podgrupy zawierające:

- a – grunty stanowiące wietrzeliny utworów starszego podłoża w postaci okruchów piaskowca i zlepieńca. W oparciu o genezę utworów przyjęto, że grunty są zagęszczone;
- b – grunty stanowiące utwory starszego podłoża – miękka skała piaskowca.

W podłożu nawiercono tylko jeden poziom wody gruntowej w utworach czwartorzędowych, gdzie poziom lustra wody wahał się w granicach od 2,4 do 5,0 m.

W latach 2010 i 2014 Przedsiębiorstwo Geologiczne S.A. z siedzibą w Krakowie wykonało w rejonie projektowanej chłodni kolejne dwa etapy badań. Wykonano: 9 wierceń (w tym 1 otwór o głębokości 45 m, 6 otworów o głębokości 25 m, 1 otwór o głębokości 20 m, 1 otwór 15 m), 8 sondowań statycznych, 8 sondowań dynamicznych i jedno badanie dylatometryczne.

Na podstawie wykonanych wierceń i zamontowanych piezometrów określono poziom wody gruntowej o swobodnym zwierciadle zalegającej w piaskach utworów czwartorzędowych.

W wynikach badań zwrócono uwagę na występowanie w porowatych piaskowcach karbonu drugiego poziomu wód o charakterze subartezyjskim. Poziomu tego nie nawiercono ze względu na pompowanie wody prowadzone w okolicznych kopalniach.

Na pobranych w trakcie wierceń próbkach wykonano badania laboratoryjne, określając w wybranych punktach krzywe uziarnienia, parametry wytrzymałościowe, granice Atterberga, edometryczne moduły ściśliwości i inne parametry fizyczne gruntów.

W podłożu wydzielono cztery serie litologiczno genetyczne: seria I – grunt sztuczny i gleba, seria II – utwory piaszczyste, seria III – utwory ilaste i pylaste, seria IV – piaskowce karbońskie. Warstwy gruntów wydzielone w ramach serii, ich stan i moduły ściśliwości podano dalej.

Pierwsza seria zbudowana jest z nasypów niekontrolowanych przykrytych często warstwą gleby i nasypów kontrolowanych zalegających na głębokości od 0,4 do 3,5 m.

Rys. 2. *Przekrój wykonany przez Przedsiębiorstwo Geologiczne S.A. w podłożu chłodni kominowej*

Rys. 3. *Schemat rozmieszczenia punktów badań Geocontrolu i punkty wyznaczania osiadań w obliczeniach numerycznych; oznaczenia badań terenowych: wiercenia (czerwone kropki), sondowania dynamiczne (żółte prostokąty) w podłożu chłodni, po prawej stronie widoczna metryka wiercenia otworu 10*

Zalegające w wierzchnich warstwach gleba i humus osiągają miąższość do 0,5 m.

W drugiej serii występują grunty sypkie akumulacji rzeczno-lodowcowej, reprezentowane głównie przez piaski drobne, średnie i grube, rzadko piaski ze żwirem, lokalnie z przewarstwieniami utworów ilasto-pylastych. Utwory te występują pod gruntami serii pierwszej i jako wkładki pomiędzy gruntami spoistymi. W warstwach przypowierzchniowych grunty sypkie zalegają w stanie średniozagęszczonym lub lokalnie luźnym. W serii drugiej wyróżniono trzy warstwy: IIa – piaski średnie, grube i drobne w stanie zagęszczonym, lokalnie z cienkimi wkładkami utworów ilastych i ilasto-pylastych o I_D=0,72 i M=130 000 kPa; IIb – piaski drobne, średnie, grube, piaski ze żwirem w stanie średniozagęszczonym o I_D=0,52 i M=82 000 kPa; IIc – piaski średnie i drobne w stanie luźnym o I_D=0,21i M=45 000 kPa.

Trzecia seria wykształcona jest jako grunty spoiste. Grunty te są wilgotne i małowilgotne. W tej serii wyróżniono pięć warstw: IIIa – iły i iły z pyłem w stanie zwartym o I_L=-0,05 i M_0=7600 kPa, M=21 700 kPa; IIIb – ił, ił z pyłem, ił z pyłem i piaskiem i ił z piaskiem w stanie twardoplastycznym o I_L=0,15, M_0=6560 kPa, M=19 940 kPa; IIIc – iły pyłem, iły z pyłem i piaskiem, miejscami iły w stanie plastycznym o I_L=0,38, M_0=3550 kPa oraz M=18 630 kPa; IIId – pył z iłem, piasek z iłem i pył z iłem w stanie twardoplastycznym, o I_L=0,18 i M_0=9200 kPa oraz M=25 500 kPa; IIIe – piasek z iłem, pył z iłem i pyl z iłem i piaskiem w stanie plastycznym o I_L=0,4 i M_0=6070 kPa oraz M=23 600 kPa.

Czwarta seria to utwory karbońskie reprezentowane przez piaskowce drobno i średnioziarniste o spoiwie ilastym, w których pojawiają się przerosty węgla. Wykonane w etapach od 1 do 3 badania wskazywały na zróżnicowanie podatności gruntów pod projektowaną chłodnią zarówno w planie, jak i z głębokością.

Czwarty etap badań został wykonany przez Instytut Konsultacyjno-Badawczy Geocontrol z siedzibą w Krakowie i firmę Hebo-Poznań. Ze względu na zmianę położenia chłodni, która nastąpiła w trakcie projektowania bloku, badania te pozwoliły uaktualnić i uzupełnić obraz podłoża pod pierścieniem fundamentowym. Badania Geocontrolu obejmowały wykonanie 5 otworów badawczych, których rozmieszczenie pokazano na rysunku 3, o głębokości 30 m – jeden w centrum, a pozostałe cztery na obwodzie pierścienia fundamentowego. Obok otworów rozmieszczonych na obwodzie

Rys. 4. *Trzy widoki (kolejno od lewej) pierwszy – widoczna siatka podziału powłoki na elementy skończone, drugi – obciążenie powłoki wiatrem i trzeci – deformacja powłoki (widok od góry modelu)*

Tabela 1. *Parametry geotechniczne warstw podłoża wyznaczone z sondowania CPTU 1 – Hebo*

Przelot warstwy		Rodzaj gruntu	Domieszki	Opór stożka	Naprężenie pionowe	Parametry stanu gruntu		Parametry wytrzymałości na ścinanie			Parametry odkształceniowe
od	do			q_c	σ_{vo}	I_D	I_L	Φ'	C'	S_u	Mo
[m]	[m]	[-]	[-]	[MPa]	[KPa]	[-]	[-]	[°]	[kPa]	[kPa]	[MPa]
0.0	0.6	nN	(Psh+G,K,bet)	-	-	-	-	-	-	-	-
0.6	3.5	Ps	-	10.4	38	0.70	-	35° 20'	-	-	52.0
3.5	7.3	Ps	-	8.3	101	0.52	-	33° 10'	-	-	37.0
7.3	8.3	Ps	/Pd	17.7	146	0.76	-	36° 10'	-	-	88.0
8.3	8.9	Gz	-	1.5	162	-	0.26	17° 50'	15.0	78.0	12.0
8.9	16.1	I	-	2.0	236	-	0.12	16° 0'	20.0	100.0	15.0
16.1	16.7	I	-	2.8	309	-	0.06	17° 0'	21.0	139.0	21.0
16.7	17.0	Ps	-	11.0	317	0.46	-	32° 30'	-	-	54.0
17.0	18.3	I	-	2.6	332	-	0.08	16° 20'	21.0	127.0	19.0
18.3	18.9	Ps	-	19.4	351	0.66	-	35° 0'	-	-	95.0
18.9	19.2	Ps	-	35.1	361	0.89	-	37° 40'	-	-	191.0

Tabela 2. *Parametry geotechniczne warstw podłoża wyznaczone z sondowania CPTU 5 – Hebo*

Przelot warstwy		Rodzaj gruntu	Domieszki	Opór stożka	Naprężenie pionowe	Parametry stanu gruntu		Parametry wytrzymałości na ścinanie			Parametry odkształceniowe
od	do			q_c	σ_{vo}	I_D	I_L	Φ'	C'	S_u	Mo
[m]	[m]	[-]	[-]	[MPa]	[KPa]	[-]	[-]	[°]	[kPa]	[kPa]	[MPa]
0.0	1.5	nN	(Psh,G,K,bet.)	-	-	-	-	-	-	-	-
1.5	8.2	Ps	-	9.9	90	0.62	-	34° 30'	-	-	44.0
8.2	8.8	Gz	-	1.2	160	-	0.29	15° 0'	12.0	64.0	11.0
8.8	13.3	I	-	1.9	208	-	0.14	15° 30'	19.0	93.0	14.0
13.3	16.0	I	-	2.3	275	-	0.10	16° 40'	21.0	114.0	17.0
16.0	16.4	Ps	//Π+Ż	8.7	304	0.39	-	31° 40'	-	-	38.0
16.4	17.9	I	-	2.5	323	-	0.09	16° 10'	20.0	125.0	19.0
17.9	23.3	Ps	cem.Π	16.9	393	0.60	-	34° 10'	-	-	83.0
23.3	23.8	Ps	cem. Π	23.9	454	0.70	-	35° 20'	-	-	129.0

Tabela 3. *Parametry geotechniczne warstw podłoża wyznaczone z sondowania CPTU 10 – Hebo*

Przelot warstwy		Rodzaj gruntu	Domieszki	Opór stożka	Naprężenie pionowe	Parametry stanu gruntu		Parametry wytrzymałości na ścinanie			Parametry odkształceniowe
od	do			q_c	σ_{vo}	I_D	I_L	Φ'	C'	S_u	Mo
[m]	[m]	[-]	[-]	[MPa]	[KPa]	[-]	[-]	[°]	[kPa]	[kPa]	[MPa]
0.0	3.3	nN	(Psh,G,K,bet)	-	-	-	-	-	-	-	-
3.3	4.2	Ps	-	20.6	69	0.92	-	38° 0'	-	-	113.0
4.2	6.0	Ps	-	6.2	93	0.42	-	32° 0'	-	-	27.0
6.0	10.8	Ps	-	2.5	145	<0.15	-	27° 10'	-	-	10.0
10.8	11.5	Gz	//Ps	1.4	189	-	0.28	17° 0'	14.0	73.0	11.0
11.5	16.2	I	-	2.1	239	-	0.11	16° 10'	20.0	104.0	16.0
16.2	19.1	I	-	2.2	311	-	0.15	15° 40'	20.0	107.0	16.0
19.1	19.6	Ps	//I	6.8	343	0.28	-	30° 20'	-	-	29.0
19.6	22.0	I	-	2.6	370	-	0.08	15° 10'	19.0	126.0	19.0
22.0	22.3	Ps	-	32.8	397	0.86	-	37° 20'	-	-	178.0

fundamentu wykonano do głębokości od 11,0 do 13,0 m sondowania dynamiczne.

Na bazie pobranych próbek wykonano dodatkowo badania laboratoryjne: dla warstwy piasków górnych (zalegających powyżej iłów) wykonano wykresy uziarnienia i określono współczynnik różnoziarnistości *U* i współczynnik krzywizny *c*, piaski górne i dolne (zalegające poniżej iłów) zbadano w edometrze, na próbkach iłów wykonano badania w aparacie trójosiowego ściskania i w edometrze. Dla gruntów spoistych określono granice Atterberga. Wykonano także jedno oznaczenie ciśnienia pęcznienia i jedno oznaczenie wskaźnika pęcznienia.

Po zakończeniu wierceń w punktach 1, 3, 5, 8 i 10 firma Hebo wykonała w ich sąsiedztwie sondowania statyczne CPTU, a w centrum chłodni dodatkowo badanie dylatometryczne do skalibrowania parametrów odkształceniowych podłoża. Badania te pozwoliły określić parametry wytrzymałościowe i odkształceniowe gruntów w badanych punktach.

Pokazane na rysunku 3 i w tabelach od 1 do 3 wyniki badań czwartego etapu przedstawione w postaci przekrojów uzyskanych z wierceń i metryk sondowania CPTU wskazują na dużą zmienność podatności warstw gruntów zalegających pod chłodnią zarówno w planie, jak i z głębokością. Ze względu na duży stopień skomplikowania budowy podłoża oraz zasięg oddziaływania fundamentu pierścieniowego szacowany na 13 m w głąb poniżej poziomu posadowienia konieczne było przeprowadzenie analizy numerycznej współpracy chłodni z podłożem.

Rys. 5. *Mapa przemieszczeń wypadkowych XYZ i przekrój chłodni z opisem warstw gruntów*

3. Analizy numeryczne posadowienia chłodni

Celem analiz numerycznych było sprawdzenie możliwości bezpośredniego posadowienia chłodni. Model numeryczny zbudowano w systemie Z_Soil 2014 v 14.10 szwajcarskiej firmy ZACE wyspecjalizowanym do rozwiązania zagadnień dotyczących geotechniki. Siatka 3D została utworzona z 204 400 izoparametrycznych ośmiowęzłowych elementów skończonych wygenerowanych na bazie 224 263 węzłów.
Przestrzenną siatkę uzyskano przez obrót płaskiej siatki zawierającej obrys przekroju powłoki łącznie z galerią i fundamentu pierścieniowego wraz z bryłą podłoża oraz obrys słupów o zmiennej geometrii wokół głównej pionowej osi modelu. Na powierzchni bocznej i na spodzie fundamentu wygenerowano powierzchniowe elementy kontaktowe. Sposób generowania i podziału siatki modelu 3D wynikał z kształtu powłoki i słupów, na których została oparta. Ponadto siatka uwzględniała możliwość przeanalizowania drugiego wariantu posadowienia chłodni (na palach), stąd przyjęty gęsty podział fundamentu pierścieniowego na elementy skończone po jego obwodzie. Stosując mikroobroty o bardzo małych kątach, uzyskano przestrzenny model geometryczny pokazany na rysunkach 4 i 5. Uwarstwione nieregularnie podłoże wygenerowano na utworzonej po obrotach bryle, stosując opcję systemu o nazwie „boreholes", bazując na wynikach wyżej opisanych badań podłoża.
Model numeryczny zawiera 51 stref materiałowych. Powłokę, słupy i fundament pierścieniowy opisano modelem sprężystym. Do opisu gruntów podłoża zastosowano model sprężysto-idealnie plastyczny z powierzchnią ograniczającą Coulomba-Mohra. Przemieszczenia węzłów zlokalizowanych na powierzchniach bocznych bryły podłoża zablokowano w dwóch kierunkach X i Z, a przemieszczenia węzłów zlokalizowanych na spodzie modelu zablokowano w trzech kierunkach X, Y i Z. Powłoka została obciążona wiatrem zgodnie z zasadami normy Eurokod 1 (rys. 4). Należy zwrócić uwagę na to, że w systemie Z_Soil główną osią pionową w modelu 3D jest oś Y. Ponadto wektory parcia i ssania wiatru w systemie Z_Soil są zawsze umieszczone na zewnątrz powłoki, jednak różnią się zwrotem – a więc od strony nawietrznej jest uwzględnione parcie wiatru, a na pozostałych powierzchniach występuje ssanie wiatru zgodnie z umieszczonym w normie schematem opływu wiatrem powierzchni walcowych.
Obliczenia sterowane funkcjami egzystencji przebiegały na zasadzie symulacji budowy kolejnych elementów chłodni – kolejno pierścienia fundamentowego i słupów, a następnie poszczególnych segmentów powłoki aż do poziomu galerii.
Uzyskane w obliczeniach numerycznych osiadania fundamentu wyznaczone w punktach badawczych 3, 5, 8, 10 i zlokalizowanych na osi równoległej do kierunku oddziaływania wiatru punktach A i B (rys. 3) pokazano w tabeli 4.

Tabela 4. *Wynik analiz numerycznych – osiadania fundamentu w punktach oznaczonych na rysunku 3*

Oznaczenie punktu wg schematu na rysunku 3	Osiadania fundamentu (cm)
3	8,39
5	7,38
8	8,20
10	13,20
A	5,68
B	10,33

4. Podsumowanie

Głównym problemem występującym przy projektowaniu posadowienia żelbetowych hiperboloidalnych chłodni kominowych jest zapewnienie równomierności i nieprzekroczenie wielkości dopuszczalnych osiadań jej fundamentów zgodnie z zapisem norm europejskich. Chłodnie są budowlami wielkoskalowymi i stąd wynika też bardzo duża powierzchnia kontaktu fundament – podłoże. W przypadku chłodni w Jaworznie średnica zewnętrzna pierścienia wynosi 144,2 m, a jego szerokość 6,5 m. Przy średniej głębokości posadowienia fundamentu 3 m poniżej poziomu terenu i głębokości strefy aktywnej dochodzącej do 13 m zasięg oddziaływania fundamentu w głąb podłoża dochodzi do 16 m, licząc od powierzchni terenu. Analizując wyniki sondowania statycznego, nietrudno zauważyć, że w obrębie tego obszaru podłoża zalegają grunty spoiste o bardzo niskich modułach ściśliwości. Rozkład słabych gruntów w podłożu jest nierównomierny zarówno w planie, jak i z głębokością, co nie pozwala w przypadku posadowienia bezpośredniego na zapewnienie równomiernych osiadań. Maksymalne osiadania chłodni wyliczone w analizach numerycznych wyniosły 13,24 cm, a więc zdecydowanie przekroczyły wartość dopuszczalną określoną w normie EC7 na 5 cm, co zdecydowało o konieczności posadowienia chłodni na palach.
Parametry technologiczne bloku energetycznego w Elektrowni Jaworzno III – Elektrownia II oddanego do eksploatacji w grudniu 2020 r. i opis realizacji jego obiektów, w tym posadowienia pośredniego fundamentów chłodni, zostały opublikowane w cyklu artykułów [1, 2, 3 i 4] wydanym w Informatorze Śląskiej Okręgowej Izby Inżynierów Budownictwa.

BIBLIOGRAFIA

[1] Klinos D., Projekt Jaworzno 910 MW. Opis i dane techniczne, Informator Śląskiej Okręgowej Izby Inżynierów Budownictwa 1 (53) kwiecień 2017, str. 28–31
[2] Krzyski A., Projekt Jaworzno 910 MW. Fundamentowanie, Informator Śląskiej Okręgowej Izby Inżynierów Budownictwa 2 (54) czerwiec 2017, str. 26–31
[3] Zmarlak M., Projekt Jaworzno 910 MW. Konstrukcje żelbetowe płyt fundamentowych obiektów budynku głównego, Informator Śląskiej Okręgowej Izby Inżynierów Budownictwa 3 (55) wrzesień 2017, str. 22–27
[4] Krzyski A., Projekt Jaworzno 910 MW. Konstrukcja stalowa kotłowni, Informator Śląskiej Okręgowej Izby Inżynierów Budownictwa 5 (57) wrzesień 2017, str. 22–27