

NUMERYCZNO-DOŚWIADCZALNA ANALIZA PRACY BLOKU ENERGETYCZNEGO NA PARAMETRY NADKRYTYCZNE W STANACH USTALONYCH

NUMERICAL AND EXPERIMENTAL ANALYSIS OF SUPERCRITICAL POWER UNIT STEADY STATE OPERATION

Eugeniusz Rusiński, Jerzy Czmochoński, Artur Górski, Michał Paduchowicz – Katedra Konstrukcji i Badań Maszyn, Politechnika Wrocławska

W artykule zajęto się opracowaniem metodyki przeprowadzania symulacji numerycznych z wykorzystaniem metody elementów skończonych i badań doświadczalnych wybranych obiektów wyspy kotłowej bloku energetycznego na parametry nadkrytyczne dla stanu jego pracy ustalonej, odpowiadającej mocy maksymalnej bloku. W wyniku przeprowadzonych obliczeń otrzymano rozkład warstw naprężeń zredukowanych oraz przemieszczeń wybranych podzespołów. W następnej kolejności przeprowadzono badania na reprezentatywnym obiekcie rzeczywistym, polegające min. na pomiarze drgań, przemieszczeń i pola temperatury. Wyniki pomiarów zostały porównane z rezultatami obliczeń, w celu walidacji modeli numerycznych [1, 2].

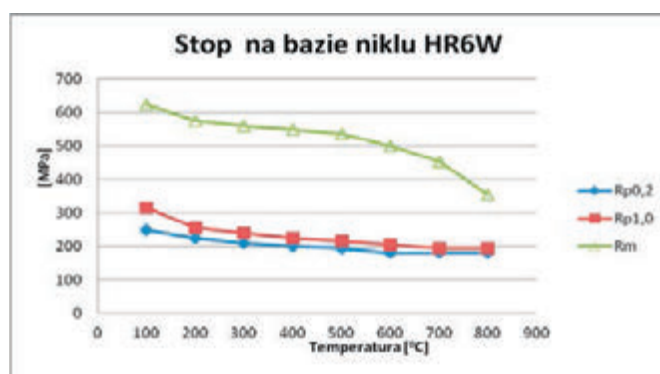
Słowa kluczowe: bloki energetyczne, badania doświadczalne, stale żarowytrzymałe, metoda elementów skończonych

It is indicated methodology of selected power boiler components numerical simulation and research in the article. All of the researches focuses on supercritical power unit steady state operations. Reduced stress and displacement distributions were the results of the calculation using FEM method. That was it made measurements of vibrations and temperature field on the power plant equipment real objects. The results both of analysis were compared at the end to make validation of numerical models. Thus the results of the calculations will be able to use to predict durability of power unit supercritical main components.

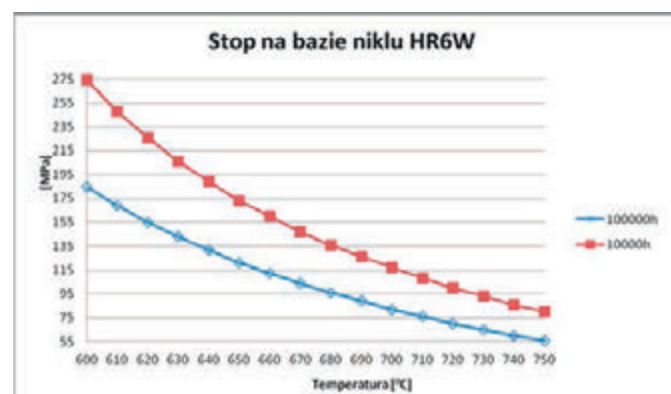
Wstęp

Stan pracy ustalonej bloku energetycznego, odpowiadający jego maksymalnej mocy, jest jednym z najczęściej występujących przypadków obciążeń. Charakteryzuje się on ustabilizowaniem obciążeń cieplnych i mechanicznych w dziedzinie czasu, przy jednocześnie najwyższych z możliwych dla danej jednostki wartościach tych wielkości. Jest to z jednej strony stan pracy bloku energetycznego w czasie, którego nie występują znaczne gradienty naprężeń w grubościennych elementach (tak jak ma to miejsce w stanach nieustalonych), z drugiej zaś, na skutek stałych w czasie obciążeń może dojść do pojawienia się uszkodzeń na powierzchniach elementów kotłowych wynikających, z

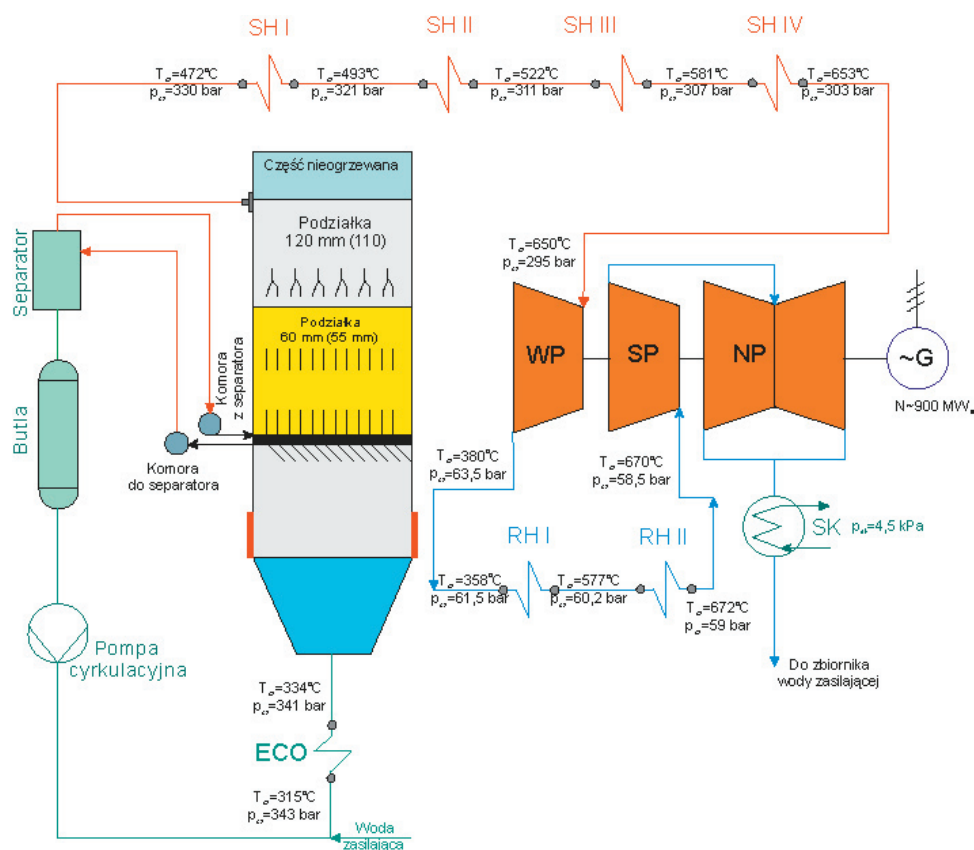
wystąpienia pełzania wysokotemperaturowego. Oczywiście, w niektórych elementach wysokociśnieniowych bloku, takich jak obszar schładzaczy wtryskowych kolektorów przegrzewaczy, może pojawić się inny typ obciążeń związanych ze zjawiskiem zmęczenia niskocyklowego lub cieplno-mechanicznego. Dodatkowym aspektem, mającym wpływ na trwałość jest zmiana wartości właściwości wytrzymałościowych i reologicznych materiałów konstrukcyjnych w podwyższonych temperaturach. Na rysunkach 1 i 2 przedstawiono wykresy zmian granicy plastyczności i wytrzymałości w funkcji zmiany temperatury, dla przykładowej wysokostopowej stali HR6W, wykorzystywanej na elementy ciśnieniowe w ultranadkrytycznych blokach energetycznych [3].



Rys. 1. Właściwości wytrzymałościowe stopu żarowytrzymałego na bazie niklu HR6W w podwyższonej temperaturze



Rys. 2. Wytrzymałość na pełzanie dla stopu żarowytrzymałego na bazie niklu HR6W



Rys. 3. Schemat technologiczny referencyjnego bloku energetycznego na parametry nadkrytyczne,
Źródło: Rafako S.A.

Zgodnie z informacjami przedstawionymi na rysunkach 1 i 2 wraz ze wzrostem temperatury następuje spadek granicy wytrzymałości i plastyczności oraz właściwości reologicznych materiału takich jak jego wytrzymałość na pełzanie. Oznacza to, że w wyniku działania długotrwałych obciążeń cieplnych i mechanicznych, o zadanych wartościach, w analizowanych obiektach mogą się pojawić naprężenia, które w konsekwencji przyczyniają się do stopniowej degradacji analizowanych obiektów. W związku z tym istotne jest określenie rzeczywistego stopnia wyężdżenia konstrukcji. Otrzymane w ten sposób obciążenia mogą pozwolić na oszacowanie trwałości tych obiektów przemysłowych [4, 5].

W pierwszej kolejności przeprowadzono obliczenia wytrzymałościowe z wykorzystaniem metody elementów skończonych dla stanu ustalonego, odpowiadającego maksymalnej mocy bloku energetycznego. Obejmowały one m.in. analizę komory paleniskowej i konwekcyjnej kotła przepływowego bloku energetycznego na parametry nadkrytyczne, pracującego w technologii przepływowej Bensona o mocy 900 MW, sprawności netto około 45,6%, opalanego węglem kamiennym. Schemat technologiczny analizowanego bloku referencyjnego przedstawiono na rysunku 3 [6].

Jednostka ta charakteryzuje się następującymi wartościami ciśnienia i temperatury pary: ciśnienie i temperatury pary świeżej na wyjściu z ostatniego stopnia przegrzewu $p_0 = 30,3 \text{ MPa}$, $T_0 = 653^\circ\text{C}$, temperatura i ciśnienie pary wtórnej na wyjściu z kotła $p_w = 6 \text{ MPa}$, $T_w = 670^\circ\text{C}$, strumień masowy pary świeżej $m_0 = 2200 \text{ Mg/h}$.

Następnie przeprowadzono pomiary na obiektach rzeczywistych, podczas których określono m.in. wartości pola temperatury i poziomu drgań w miejscach takich jak włązy

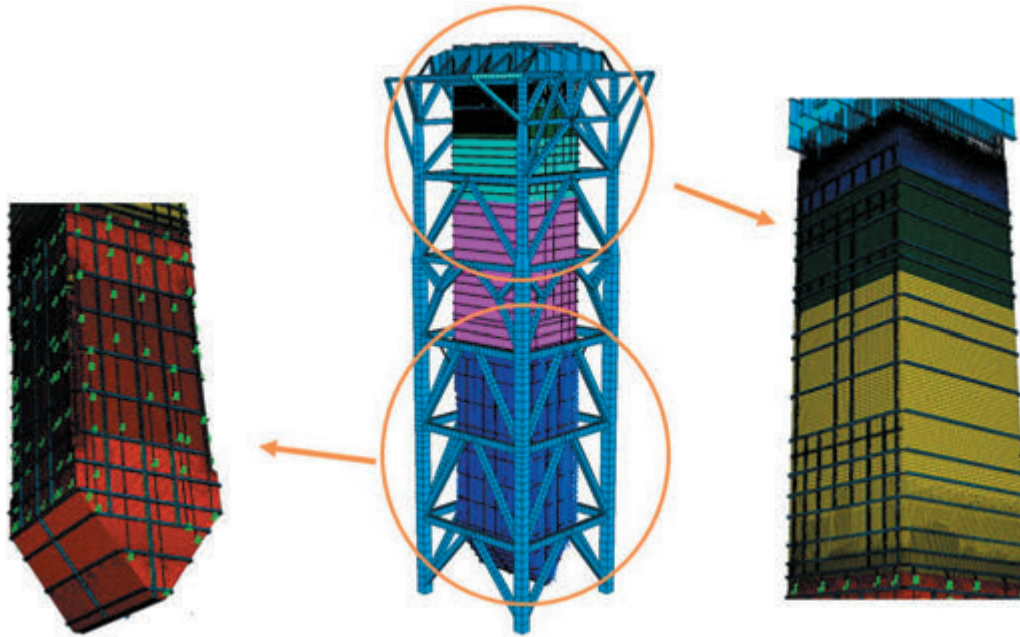
rewizyjne, które są bezpośrednio zamocowane do parowników kotła [1, 7].

Obliczenia numeryczne kotła, referencyjnego bloku energetycznego

Najpierw został opracowany uproszczony model dyskretny komory paleniskowej i konwekcyjnej wraz z konstrukcją nośną, pokazany na rysunku 4. Ściany szczelne wykonane z rur wznoszących połączonych między sobą za pomocą płaskowników, zostały zastąpione powierzchniami przechodzącymi przez środki grubości płaskowników dyskretyzowanymi za pomocą elementów powłokowych o właściwościach mechanicznych odpowiadających właściwościom rzeczywistych parowników [8, 9].

Natomiast pozostałe elementy takie jak bandaże, cięgna i konstrukcja wsporcza, na której zawieszona jest konstrukcja kotła, zdyskretyzowano z użyciem elementów belkowych, o przekrojach odpowiadających przekrojom rzeczywistych podzespołów kotłowych. Obliczenia wytrzymałościowe obejmowały zarówno wpływ obciążeń cieplnych tj. temperatura pary w rurach wznoszących i mechanicznych takich jak: ciśnienie pary wewnątrz rur wznoszących, podciśnienie spalin wewnątrz komory paleniskowej, a także obciążenia masowe. Przyjęte do obliczeń wartości obciążeń odpowiadają stanowi pracy ustalonej dla maksymalnego poziomu mocy bloku [10].

Symulacje numeryczne składały się z dwóch etapów. W pierwszym z nich przeprowadzono obliczenia cieplne (rys. 5). Otrzymany w ten sposób rozkład pola temperatury na powierzchni parownika, wzdłuż jego wysokości jest skutkiem procesów spalania i odbioru ciepła przez odpowiednie powierzchnie ogrzewalne. Następnie przeprowadzono analizę

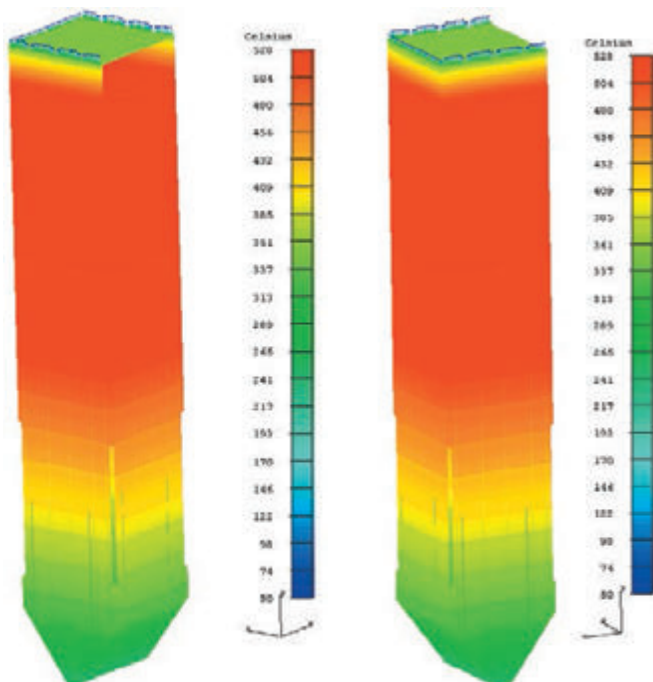


Rys. 4. Widok modelu dyskretnego komory paleniskowej

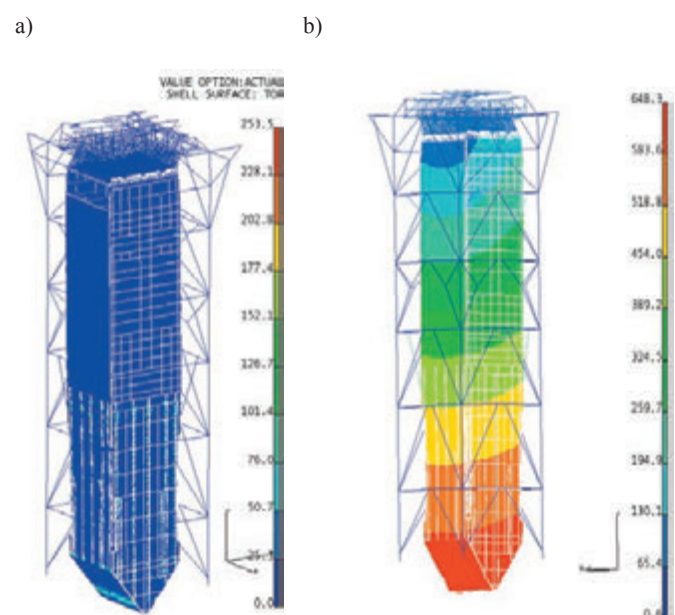
wytrzymałościową, w ramach, której uwzględniono zarówno obciążenia cieplne (gradient temperatury wynikający z różnicy temperatur), jak i obciążenia mechaniczne (ciśnienia, mas zespołów umieszczonych w obrębie kotła). W wyniku przeprowadzonej symulacji, zaobserwowano m.in. znaczne wydłużenie komory paleniskowej, ponadto ugięcie stropu górnego konstrukcji wsporczej, a także pojawienie się wysokich naprężeń zredukowanych w konstrukcji. Badania numeryczne wykazały m.in., że największe naprężenia zredukowane dla kotła występują w obszarze połączenia ścian szczelnych części paleniskowej z taśmami spinającymi część spiralną i pionową kotła. Wyniosły one około 253 MPa. Warto dodać, że ściany szczelne wykonane są ze stali T92 o granicy plastyczności

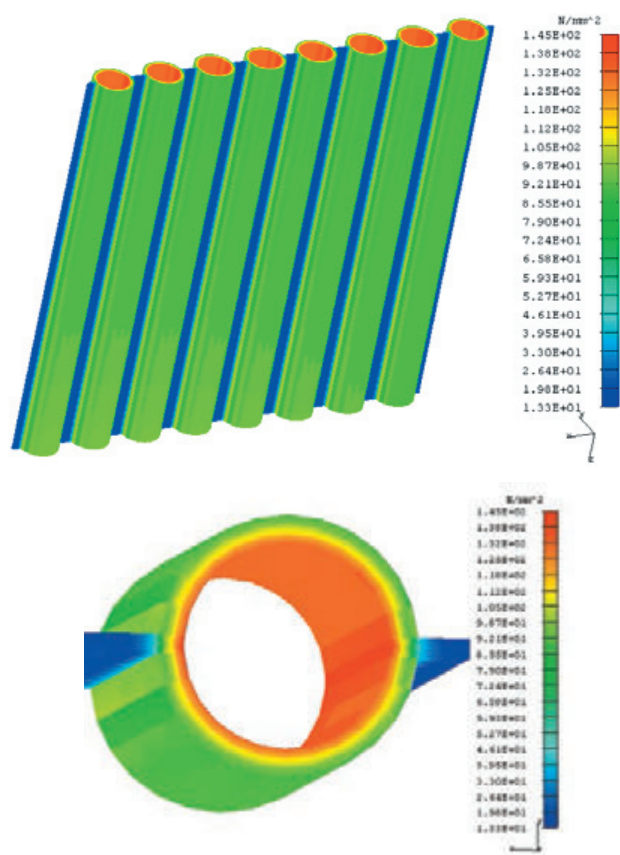
mieszczącej się w przedziale od 177 MPa (dla temperatury stali 650 °C) do 420 MPa (dla temperatury stali 100 °C) [11].

W przypadku komory konwekcyjnej maksymalne naprężenia zredukowane o wartości około 214 MPa, były zlokalizowane w obszarze festonu. Dla pozostałych obszarów, zarówno, komory paleniskowej jak i konwekcyjnej, naprężenia zredukowane w ścianach szczelnych nie przekraczają 200 MPa (rys. 6). W przypadku konstrukcji nośnej, maksymalne naprężenia zredukowane równe 260 MPa, pojawiły się w miejscu łączenia słupów nośnych z rusztem górnym. Biorąc pod uwagę, że materiałem konstrukcyjnym, z którego wykonany jest ten ustrój nośny jest stal S355, o granicy plastyczności równej 355 MPa, oznacza to, że konstrukcja w tym obszarze, ze względu



Rys. 5. Rozkład pola temperatury na powierzchni parownika kotła bloku referencyjnego

Rys. 6. Przykładowe wyniki obliczeń kotła bloku referencyjnego
a) warstwie naprężeń zredukowanych wg hipotezy Hubera-Misesa [MPa] b) warstwie przemieszczeń uogólnionych [mm]



Rys. 7. Warstwy naprężeń zredukowanych wg hipotezy Hubera-Misesa [MPa] w jednym z fragmentów parownika analizowanego bloku energetycznego

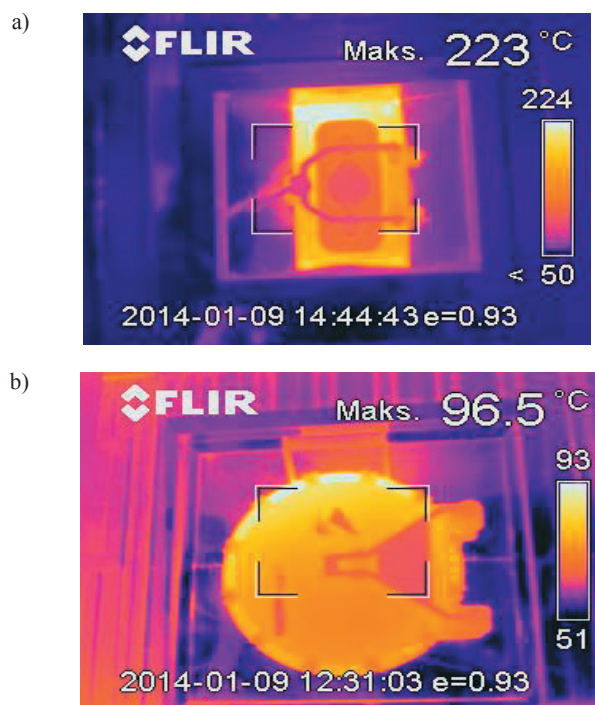
na niską wartość współczynnika bezpieczeństwa, jest narażona na uplastycznienie [12, 13].

Ponadto w celach porównawczych przeprowadzono obliczenia wytrzymałościowe wycinków ściany szczelnej, wykorzystując w tym celu, przygotowane wcześniej ich dyskretne modele bryłowe (rys. 7).

Na podstawie otrzymanych wyników można stwierdzić, iż zarówno w samej konstrukcji kotła, jak i jego ustroju nośnym wystąpiły wysokie poziomy naprężenia wynoszące ponad 200 MPa. Są to lokalne koncentracje naprężeń wynikające m.in. z miejscowych usztywnień parownika (w obszarze łączenia taśm spinających ściany szczelne części spiralnej i pionowej komory paleniskowej). Natomiast na powierzchniach wewnętrznych rur wznoszących, najwyższe naprężenia zredukowane wyniosły około 150 MPa, co jest wartością niższą od granicy plastyczności dla stali T92 w temperaturze ich pracy (dla temperatury 528°C granica plastyczności tej stali wynosi około 300 MPa) [12, 13].

Badania na obiekcie rzeczywistym

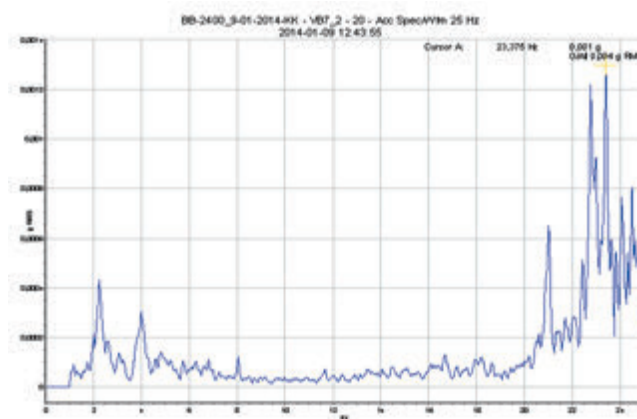
W celu oceny otrzymanych wyników obliczeń numerycznych, pod kątem walidacji modeli numerycznych, przeprowadzono badania na reprezentatywnym obiekcie rzeczywistym. Kocioł wybrany do badań jest zbliżony swymi gabarytami i parametrami technicznymi do jednostki należącej do bloku referencyjnego. W ramach wykonanych prac zmierzono m.in. pola temperatury w obszarze włączów rewizyjnych. W tym celu



Rys. 8. Termogramy zarejestrowane na poszyciu kotła przyjętego do badań: a) rejon włączu rewizyjnego na poziomie 68 m wysokości kotła, b) rejon włączu rewizyjnego na poziomie 120 m wysokości kotła

wykorzystano kamerę i aparat termowizyjny oraz pirometr. Przykładowe termogramy zarejestrowane w obrębie komory paleniskowej i konwekcyjnej przedstawiono na rysunku 8 [14].

Największą wartość temperatury równą 223°C, określono w ten sposób na poziomie 68 m wysokości kotła, w obszarze rurosuszarek. Rozbieżności w wartościach temperatury wynikają przede wszystkim z tego, że miejsca, w których przeprowadzono badania, nie są bezpośrednio narażone na oddziaływanie płomienia paleniska oraz gorących spalin (są to przede wszystkim włączu rewizyjne, zabudowane we wnękach ścian szczelnych) i przez to mają one niższą temperaturę od pozostałej części parownika. Natomiast pomiary temperatury ścian komory, wykonane za pomocą termopar bezpośrednio na nich naklejonych, wykazały dużą zbieżność wartości zmierzonych, jak i wyznaczonych z wykorzystaniem metody elementów skończonych [15].

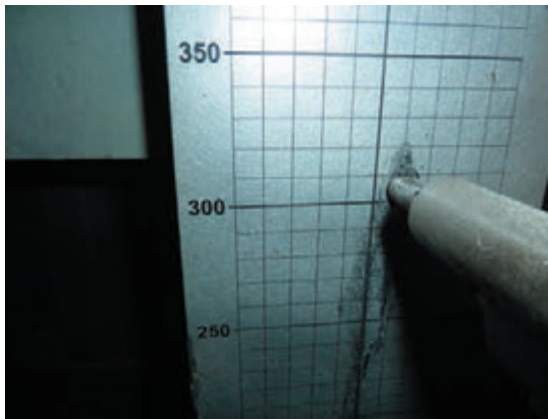


Rys. 9. Przykładowe widmo charakterystyki częstotliwościowej drgań w jednym z punktów pomiarowych na poziomie 86,2 m wysokości kotła

Jednocześnie został zmierzony poziom drgań występujących na parowniku z korzystaniem wibrometru 2-kanalowego, głowicy laserowej oraz czujników przyspieszeń, podłączonych do rejestratora wielokanałowego. Otrzymane wyniki poddano analizie Fouriera, w wyniku czego otrzymano widma charakterystyk częstotliwościowych drgań (rys. 9).

Dominujące częstotliwości drgań wyniosły m.in. 8,16 Hz, 22 Hz, 23 Hz. Porównując te wartości z częstotliwościami drgań własnych, wyznaczonymi w wyniku numerycznej analizy modalnej, można z dużym prawdopodobieństwem określić czy mieszczą się one w zakresie drgań rezonansowych. Wystąpienie tego zjawiska jest istotne z punktu widzenia szacowania trwałości obiektów energetycznych [12, 15].

Dodatkowo przeprowadzono pomiary przemieszczeń komory paleniskowej i konwekcyjnej.



Rys. 10. Pomiar przemieszczeń komory paleniskowej na jednym z poziomów

Badania zostały przeprowadzone na trzech poziomach wysokości bloku. Wartości pionowego przemieszczenia zarejestrowanego w trakcie badań wyniosły odpowiednio 320 mm,

450 mm i 635 mm. Są one zbliżone do wyników otrzymanych w ramach obliczeń numerycznych [16].

Podsumowanie

W artykule została przedstawiona metodyka badań obiektów energetycznych pod kątem określenia ich rzeczywistego stanu wyężenia, na przykładzie konstrukcji kotła bloku przepływowego, pracującego w stanie ustalonym z maksymalną mocą. Prace te podzielono na dwa etapy. W ramach pierwszego z nich opracowano najpierw model numeryczny komory paleniskowej i konwekcyjnej wraz z ich ustrojem nośnym. Następnie zdefiniowano warunki brzegowe do przeprowadzenia analizy wytrzymałościowej, m.in. takich jak temperatura i ciśnienie pary odpowiadające stanowi pracy ustalonej dla jego maksymalnej mocy. Wyniki obliczeń wytrzymałościowych wykazały, iż miejscami koncentracji naprężeń dla stanu pracy ustalonej są m.in. obszar łączenia parowników z taśmami spinających część spiralną z pionową parowników kotła. Drugim etapem metodyki było przeprowadzanie badań na instalacji kotłowej możliwie jak najbardziej zbliżonej pod względem konstrukcji i parametrów pracy. W ramach tych prac zostały zmierzone temperatury, częstości drgań oraz przemieszczenia komory paleniskowej. Wyniki pomiarów, były zbliżone do rezultatów analizy numerycznej. Zatem, opracowany model numeryczny kotła, w dużym stopniu odzwierciedla zachowanie się rzeczywistego obiektu.

Oznacza to, że wyniki obliczeń w postaci pola temperatury, warstwicy naprężeń i przemieszczeń mogą zostać wykorzystane do innych prac badawczych, dotyczących m.in. wyznaczenia trwałości parownika tej konstrukcji ze szczególnym uwzględnieniem zjawiska pełzania i zmęczenia. Można tu wykorzystać jeden z wielu modeli zniszczenia takich jak Bieleckiego-Gursona, bądź też zaproponowanego przez Robinsona i Taira.

Badania zaprezentowane w powyższym artykule, zostały wykonane w ramach Programu Strategicznego „Zaawansowane technologie pozyskiwania energii”, dofinansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Literatura

- [1] Damazy L., Pawlik M., Strzelczyk F., Elektrownie, WNT, Wydanie czwarte, Warszawa 2000
- [2] Czmochoński J., Górski A., Smolnicki T., Wybrane problemy z obliczeń wytrzymałościowych ekranów komory paleniskowej kotła rusztowego wodnorurowego. Systems 2004 vol. 9, s. 238-244
- [3] Czmochoński J., Górski A., Sawicki M., Śliwka A., Analiza termiczno-wytrzymałościowa MES kanału spalin kotła energetycznego. Systems 2004 vol. 9, s. 228-237
- [4] Czmochoński J., Górski A., Iluk A., Analiza wytrzymałościowa kotła wodnorurowego parowego OR-45, Transport Przemysłowy. 2008, nr 2, s. 195-199
- [5] Bis Z., Kotły fluidalne- Teoria i praktyka, Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 2010
- [6] Okrajni J., Badanie zmęczenia cieplno-mechanicznego w ujęciu obowiązujących norm i jego komputerowe modelowanie Acta Mechanica et Automatica, 2009
- [7] Przygoda A., Cieszyński K., Sutowicz A., Numeryczna weryfikacja stanu cieplno- mechanicznego wybranych elementów ciśnieniowych kotłów energetycznych, Systems: Journal of Transdisciplinary Systems Science. 2012, vol. 16, nr 2, s. 267-27
- [8] Rusiński E., Czmochoński J., Smolnicki T., Modelowanie pęknięcia zmęczeniowego w ustrojach nośnych MCR.; Rozwój podstaw budowy, eksploatacji i badań maszyn roboczych ciężkich - w tym budowlanych. V Konferencja, Zakopane, 21-25 stycznia 1992 Warszawa
- [9] Rusiński E., Czmochoński J., Górski A., Numeryczna ocena stanu degradacji konstrukcji nośnych kotłów i urządzeń. Konferencja Naukowo-Techniczna, Energetyka 2000. Wrocław, 2000
- [10] Rusiński E., Górski A., Modelowanie konstrukcji nośnych kotłów w Elektrowni Turów. Energetyka NR 2 1998, str. 65-72
- [11] Rusiński E., Czmochoński J., Smolnicki T., Zaawansowana metoda elementów skończonych w ustrojach nośnych, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2000

- [11] Zienkiewicz O. C.; Taylor R. L., The Finite Element Method. Fourth Edition. vol. 1 i 2. McGRAW-HILL Book Company 1991
- [12] Górski A., Iluk A., Rusiński E., Diagnozowanie stanu odkształcenia ustroju nośnego komory paleniskowej fluidalnego kotła energetycznego, *Przegląd Mechaniczny*. 2004 r. 63, nr 6, s. 11-16
- [13] Iluk A., Górski A., Czmochocki J., Rusiński E., Analiza układu kompensacji termicznej połączenia kanałów powietrza pierwotnego z komorą paleniskową kotła fluidalnego, *Systems. Journal of Transdisciplinary Systems Sciences*. 2010, vol. 14, spec iss., s. 125-131
- [14] Paduchowicz M., Górski A., Czmochocki J., Rusiński E., Numerical and experimental identification of fluid power boiler convection chamber vibration, *Journal of Vibroengineering* 2012 Issue 1, s. 151-156
- [15] Paduchowicz M., Górski A., Czmochocki J., Identyfikacja przyczyn uszkodzeń wentylatorów powietrza pierwotnego i wtórnego fluidalnego kotła energetycznego *Energetyka*. 2010, temat. nr 21, s. 114-117
- [16] Czmochocki J., Górski A., Paduchowicz M., Rusiński E., Diagnostic method of measuring hanger rods tension forces in the suspension of the power boilers combustion chamber, *Journal of Vibroengineering*. 2012, vol. 14, iss. 1, s. 129-134

