

Opracowanie innowacyjnej i efektywnej kosztowo technologii redukcji emisji rtęci do atmosfery z procesów spalania węgla

Małgorzata Iwona SZYMKOWSKA*, Jacek GÓRALSKI, Elżbieta MAĆKIEWICZ – Instytut Chemii Ogólnej i Ekologicznej, Politechnika Łódzka, Łódź; Piotr KULA, Piotr NIEDZIELSKI, Robert PIETRASIK – Instytut Inżynierii Materiałowej, Politechnika Łódzka, Łódź; Krzysztof JÓŻWIK – Instytut Maszyn Przepływowych, Politechnika Łódzka, Łódź

Prosimy cytować jako: CHEMIK 2014, 68, 3, 205–210

Z uwagi na przemysłową działalność człowieka, od kilkunastu lat obserwuje się zwiększoną emisję rtęci do środowiska. Szacuje się, że na świecie w 2010 r. z antropogenicznych źródeł wyemitowano 1960 ton rtęci, co stanowiło 30% całkowitej emisji. Za pozostałe 70% uważa się procesy geologiczne (10%) i wtórną emisję z powierzchni wód i gleb (60%) [1]. Szacuje się, że za 24% emisji rtęci ze źródeł antropogenicznych odpowiedzialne jest wytwarzanie energii z procesów spalania węgla.

Skażenie rtęcią, początkowo postrzegane jako poważny problem lokalny, stanowi obecnie problem globalny. Mimo iż rtęć w środowisku występuje w ilościach śladowych, to ze względu na jej wysoką toksyczność oraz zdolność włączania się w różne cykle obiegu przyrodniczego, stanowi poważne zagrożenie dla zdrowia i życia ludzi [2, 3]. W związku z tym kraje Unii Europejskiej oraz Stany Zjednoczone wdrażają nowe dyrektywy i ustawy limitujące dopuszczalne poziomy emisji rtęci do środowiska. Jednak, w rejonach świata, gdzie dominują państwa rozwijające się (m.in. wschodnia i południowo-wschodnia Azja), emisja rtęci jest na bardzo wysokim poziomie. W 2010 r. wyniosła ona 777 ton, co stanowiło 40% globalnej emisji ze źródeł antropogenicznych [1].

W Polsce, wg danych GUS, emisja rtęci w 2010 r. wyniosła 10,1 t [4]. Natomiast, raport EMEP (ang. *The European Monitoring and Evaluation Programme*) szacuje emisję rtęci w Polsce w tym samym roku na poziomie aż 14,9 t, z czego niemal 9 t pochodziło z procesów spalania węgla [5]. Warto zauważyć, że wartości te w 2005 r. były znacząco wyższe i wynosiły analogicznie 20 i 18,5 t [6]. Mimo iż emisja rtęci w Polsce systematycznie spada, wg raportu EMEP z 2010 r., nasz kraj znajduje się na pierwszym miejscu, jako największy emiter rtęci spośród krajów europejskich [5, 7]. Głównym źródłem emitowanej rtęci są procesy spalania węgla dla celów energetycznych. Ponad 90% energii elektrycznej w Polsce jest wytwarzane ze spalania węgla, w tym 59% z węgla kamiennego i 34% z węgla brunatnego [8, 9]. Jak podają dane literaturowe, pokłady węgla brunatnego charakteryzują się dwu- lub trzykrotnie większą zawartością rtęci niż pokłady węgla kamiennego [9 ÷ 12]. W związku z występowaniem w Polsce dużych złóż węgla brunatnego, w drugiej połowie XX w. wybudowano kilka dużych elektrowni, które opalane są tym rodzajem paliwa. Największą z nich, zarówno w Polsce jak i w Europie, jest Elektrownia Bełchatów, której moc bloków energetycznych wynosi 5298 MW, co stanowi ok. 20% krajowej produkcji energii elektrycznej [13].

Poziom rtęci w polskich węglach waha się w szerokim zakresie. Z badań krajowych węgla wynika, że średnia zawartość rtęci w węglu kamiennym wynosi od 50 do 150 ppb, a w węglu brunatnym od 120 do 370 ppb [10]. Według Meij i in. polskie węgle charakteryzują się dwukrotnie wyższą zawartością rtęci niż węgle z innych rejonów świata. Średnia zawartość rtęci dla polskich węgla

wyniosła 350 ppb, natomiast dla węgla ze Stanów Zjednoczonych tylko 140 ppb [14]. Jednak, wg Olkuskiego, nie ma istotnych różnic w zawartości rtęci w polskich i amerykańskich węglach [15]. Nie ulega wątpliwości fakt, iż pokłady węgla brunatnego zawierają więcej rtęci niż pokłady węgla kamiennego. Związane jest to występowaniem dużych ilości minerałów siarczkowych w węglu brunatnym. Uważa się, że w niektórych węglach aż 60–70% rtęci jest związana z pirytem [16 ÷ 18].

W procesie spalania węgla następuje szereg reakcji chemicznych, które prowadzą do rozkładu wszystkich związków chemicznych zawierających rtęć. W wyniku tych procesów w temp. powyżej 900°C w spalinach znajduje się już tylko rtęć metaliczna Hg^0 w postaci pary. W wyniku ochładzania strumienia spalin, w temp. poniżej 540°C, rtęć ta może zostać utleniona przez inne składniki spalin, takie jak: NO_2 , HCl , SO_2 , H_2O oraz popiół lotny [11, 19, 20]. Powstałe w ten sposób związki chemiczne (głównie $HgCl_2$ oraz: $HgBr_2$, HgI_2 , Hg_2O , HgO , Hg_2CO_3 , $Hg(NO_3)_2$, $HgSO_4$) mogą sorbować się na cząstkach popiołu. Rtcę emitowaną do atmosfery z sektora energetycznego może występować w trzech postaciach [21]:

- gazowa rtęć elementarna – $Hg^0_{(g)}$
- utleniona gazowa rtęć – $Hg^{II}_{(g)}$
- rtęć zaadsorbowana na cząstkach pyłów – $Hg_{(p)}$.

Szacuje się, że w wyniku spalania węgla do atmosfery uwalnia się od 30 do 75% rtęci obecnej w paliwie. Obecność w elektrowniach konwencjonalnych instalacji usuwających pyły oraz SO_2 ze strumienia spalin, powoduje jednocześnie redukcję emisji rtęci do powietrza. Szacuje się, że nawet 40% rtęci zawartej w spalinach może zostać usunięte za pomocą elektrofiltrów, a do 80% w instalacji mokrego odsiarczania spalin [21]. Dotyczy to jednak utlenionej rtęci dwuwartościowej $Hg^{II}_{(g)}$ oraz zaadsorbowanej na cząstkach pyłów $Hg_{(p)}$. Rtcę gazową elementarną $Hg^0_{(g)}$ jest najgroźniejszą formą rtęci ze względu na jej trwałość (czas życia w atmosferze od 6 miesięcy do 2 lat), możliwość transportowania na bardzo duże odległości oraz nierozpuszczalność w wodzie [22]. Skuteczność usuwania rtęci przy użyciu wyżej wymienionych metod wynosi od kilku do 25% [15, 23]. Zatem, w wyniku procesów spalania węgla gazowa rtęć elementarna w znacznej większości jest emitowana do atmosfery.

Zgodnie z założeniami polityki energetycznej Unii Europejskiej, udział węgla w produkcji energii elektrycznej i ciepła będzie się systematycznie zmniejszał [24]. W 2030 r. udział węgla w sektorze energetycznym ma się zmniejszyć o ok. 30% w porównaniu do sytuacji obecnej. Różnica ta ma być zastąpiona głównie przez energię jądrową (17%) i energię generowaną ze źródeł odnawialnych (14%) [25]. Należy jednak sądzić, iż w Polsce w najbliższych dziesięcioleciach głównym źródłem pozyskiwania energii elektrycznej pozostanie proces spalania węgla [26].

Jak dotąd wielkość emisji rtęci z elektrowni i elektrociepłowni w Europie, i tym samym w Polsce, jest wielkością nienormowaną. Unia Europejska systematycznie zastrzega wymagania ograniczające

Autor do korespondencji:
Dr hab. inż. Małgorzata Iwona SZYMKOWSKA, e-mail: malgorzata.szynkowska@p.lodz.pl

emisje do atmosfery. Przykładem takich działań są przyjęte przed kilkoma laty dyrektywy IPPC (ang. *Integrated Pollution Prevention and Control*), LCP (ang. *Large Combustion Plants*) oraz NEC (ang. *National Emission Ceilings*). Podstawowym aktem prawnym, który pośrednio dotyczy kwestii ograniczania emisji rtęci jest *Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2010/75/UE z dnia 24.11.2010 w sprawie emisji przemysłowych – Industrial Emission Directive (IED)*, która zastępuje m.in. *Dyrektywę Parlamentu Europejskiego i Rady 2008/1/UE z dnia 18.01.2008 r. w sprawie zintegrowanego zapobiegania i ograniczania zanieczyszczeń – Integrated Pollution Prevention and Control (IPPC)* oraz kilka innych dyrektyw. Dyrektywa z 2010 r. dodatkowo zwiększa rolę Najlepszych Dostępnych Technik BAT (ang. *Best Available Techniques BAT*) oraz od 2016 r. wprowadza zaostrzone standardy emisji SO_2 , NO_x i pyłów, co pozwoli również ograniczyć emisję rtęci do atmosfery [27]. W październiku 2013 r. przedstawiciele ze 140. krajów oficjalnie podpisali Światową Konwencję Rzęciową, tzw. Konwencję Minamata [28], która:

- wprowadza obowiązek kontroli emisji rtęci do atmosfery z określonych źródeł emisji (instalacje spalania węgla, hutnictwo metali, instalacje spalania odpadów, produkcja cementu, przemysłowa produkcja złota) – odejście od wskaźnika wielkości emisji
- określa wymagania w stosunku do nowych i starych źródeł emisji m.in. w zakresie stosowania BAT
- określa działania naprawcze
- odnosi się do przyjęcia limitów emisji
- ustanawia obowiązek inwentaryzacji emisji rtęci do powietrza. Celem konwencji jest:
- zmniejszenie podaży oraz popytu na stosowanie rtęci w produktach i procesach technologicznych
- wprowadzenie zakazu lub ograniczenie międzynarodowego handlu rtęcią
- zmniejszenie emisji rtęci do atmosfery oraz jej uwolnień do środowiska
- bezpieczne gospodarowanie odpadami zawierającymi rtęć.

Na całym świecie trwają intensywne badania mające na celu opracowanie technologii, które pozwoliłyby na redukcję emisji rtęci z sektora energetycznego. Technologie usuwania rtęci ze spalin z elektrowni i elektrociepłowni są opracowywane i wdrażane przede wszystkim w Stanach Zjednoczonych. Kraj ten w 2011 r. wprowadził nowe, restrykcyjne poziomy emisji rtęci do atmosfery. Dla instalacji już istniejących limit ten wynosi $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$, natomiast dla nowo budowanych – $3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ [29].

Metody ograniczania emisji rtęci do powietrza z procesów spalania węgla można podzielić na pierwotne (ang. *precombustion*) i wtórne (ang. *postcombustion*) [26]. Wśród metod pierwszej grupy można wymienić: selektywne górnictwo i wzbogacanie węgla, natomiast do drugiej grupy należą metody, w których stosuje się dodatki halogenków lub sorbentów, w większości bazujących na węglu aktywowanym [21, 26, 30]. W ostatnim przypadku największymi problemami są wysoki koszt węgla aktywowanego oraz zagospodarowanie powstałych odpadów. Dlatego też naukowcy Politechniki Łódzkiej (Instytut Chemii Ogólnej i Ekologicznej – Wydział Chemiczny, Instytut Maszyn Przepływowych i Instytut Inżynierii Materiałowej – Wydział Mechaniczny) wraz z konsorcjantem biznesowym, PGE GiEK SA oddział Elektrownia Bełchatów podjęli się realizacji projektu pt.: „Opracowanie innowacyjnej i efektywnej kosztowo technologii redukcji emisji rtęci do atmosfery z procesów spalania węgla”. Geneza realizacji tego projektu wyniknęła z potrzeby opracowania i wdrożenia technologii redukcji emisji rtęci do atmosfery dla sektora energetycznego. Na cel bezpośredni projektu składają się następujące cele szczegółowe:

- wytwarzanie oraz charakterystyka strukturalna i funkcjonalna wielowarstwowego kompozytu sorbującego

- opracowanie w skali laboratoryjnej etapu technologicznego z zastosowaniem wielowarstwowego sorbentu pozwalającego na obniżenie stężenia rtęci w strumieniu gazów odlotowych poprzez efektywną sorpcję rtęci w symulowanych warunkach rzeczywistych
- projekt i realizacja rzeczowa oraz eksploatacja nadzorowana demonstratora technologii sorpcji rtęci na obiekcie rzeczywistym w skali 1:200
- projekt i realizacja rzeczowa instalacji demonstratora do desorpcji i utylizacji rtęci z wielowarstwowego kompozytu sorbującego
- opracowanie wytycznych konstrukcyjnych i technologicznych dla kompleksowej instalacji przemysłowej usuwania i utylizacji rtęci. Badania w skali laboratoryjnej oraz na demonstratorze w skali 1:200 będą prowadzone w kierunku opracowania jak najbardziej skutecznego i efektywnego kosztowo rozwiązania technologicznego o potencjalnym zastosowaniu w skali przemysłowej. Dodatkowo, zaproponowana technologia wymagać będzie możliwie jak najmniejszej ingerencji w istniejący już proces technologiczny.

Praca wykonana w ramach projektu nr POIG.01.03.01-10-109/12
współfinansowanego z NCBIR

Literatura

1. United Nations Environmental Programme (UNEP), 2013. *Global Mercury Assessment 2013: Sources, Emissions, Releases and Environmental Transport*. UNEP Chemicals Branch, Geneva, Switzerland.
2. Szykowska M.I., Leśniewska E., Paryczak T.: *Konieczność kontrolowania rtęci w środowisku*. Przemysł Chemiczny 2003, **82**, 3, 240–243.
3. Leśniewska E., Szykowska M.I., Paryczak T.: *Główne źródła rtęci w organizmach ludzi nienarażonych zawodowo*. Rocznik Ochrona Środowiska 2009, **11**, 1, 403–419.
4. Krajowy Ośrodek Bilansowania i Zarządzania Emisjami: *Krajowy bilans emisji SO_2 , NO_x , CO, NH_3 , NMLZO, pyłów, metali ciężkich i TZO za lata 2010–2011 w układzie klasyfikacji SNAP. Raport syntetyczny*.
5. Bartnicki J., Gusev A., Aas W., Fagerli H., Valiyaveetil S.: *Atmospheric supply of nitrogen, lead, cadmium, mercury and dioxins/furans to the Baltic Sea in 2010*. Summary Report HELCOM 2012.
6. *Inwentaryzacja emisji do powietrza SO_2 , NO_2 , NH_3 , CO, pyłów, metali ciężkich, NMLZO i TZO za rok 2005*. Wyd. Instytut Ochrony Środowiska, marzec 2006.
7. Pacyna J.M., Munthen J., Wilson S., Maxon P., Sundseth K., Pacyna E.G., Harper E., Kindbom K., Wangberg I., Panasiuk D., Glodek A., Leaner J., Dabrowski J.: *Technical background report to the global atmospheric mercury assessment*. Arctic Monitoring and Assessment Programme/UNEP Chemical Branch, 2008.
8. Grudziński Z.: *Konkurencyjność wytwarzania energii elektrycznej z węgla brunatnego i kamiennego*. Polityka Energetyczna 2010, **13**, 2, 157–170.
9. Zysk J., Wyrwa A., Pluta M.: *Emissions of mercury from the power sector in Poland*. Atmospheric Environment 2011, **45**, 605–610.
10. Wojnar M., Wisz J.: *Rtęć w polskiej energetyce*. Energetyka 2006, **4**, 622, 59–66.
11. Wichliński M., Kobytecki R., Bis Z.: *Emisja rtęci podczas termicznej obróbki paliw*. Polityka Energetyczna 2011, **14**, 2, 191–202.
12. Lorenz U., Grudziński Z.: *Zawartość rtęci jako potencjalny czynnik ograniczający wartość użytkową węgla kamiennego i brunatnego*. Górnictwo i Energetyka 2007, **3**, 1, 335–349.
13. Strona internetowa PGE Górnictwo Energetyka Konwencjonalna SA Elektrownia Bełchatów: <http://www.elbelchatow.pgegiiek.pl/>.
14. Meij R., Vredenburg L.H.J., Winkel H.: *The fate and behaviour of mercury in coal-fired power plants*. Journal Air & Waste Management Association 2002, **52**, 912–917.
15. Olkusi T.: *Porównanie zawartości rtęci w węglach polskich i amerykańskich*. Polityka Energetyczna 2007, **10**, 2, 603–611.

16. United States Environment Protection Agency, *Control of mercury emissions from coal-fired electric utility boilers*. 2002, Interim Report including Errata data.
17. Diehl S.F., Goldhaber M.B., Hatch J.R.: *Modes of occurrence of mercury and other trace elements in coals from the warrior field, Black Warrior Basin, Northwestern Alabama*. International Journal of Coal Geology 2004, **59**, 193–208.
18. Song D., Qin Y., Zhang J., Wang W., Zheng C.: *Concentration and distribution of trace elements in some coals from Northern China*. International Journal of Coal Geology 2007, **69**, 179–191.
19. Gale T., Lani B., Offen G.: *Mechanism governing the fate of mercury in coal-fired power systems*. Fuel Processing Technology 2008, **89**, 139–151.
20. Zheng Y., Jensen A.D., Windelin Ch., Jensen F.: *Review of technologies for mercury removal from flue gas from cement production processes*. Progress in Energy and Combustion Science 2012, **38**, 599–629.
21. Gostomczyk M.A., Jędrusik A., Świerczok A.: *X Konferencja „POL-EMIS” 2010*, Polanica-Zdrój, 135–144.
22. Galbreath K.C., Zygarlicke C.J.: *Mercury transformations in coal combustion flue gas*. Fuel Processing Technology 2000, **65–66**, 289–310.
23. Pavlish J.H., Sondreal E.A., Mann M.D., Olson E.S., Galbreath K.C., Laudal D.L., Benson SA: *Status review of mercury control options for coal-fired power plants*. Fuel Processing Technology 2003, **82**, 89–116.
24. Chmielniak T.: *Szanse i bariery w rozwoju technologii energetycznych paliw kopalnych*. Polityka Energetyczna 2011, **14**, 2, 23–34.
25. Malko J.: *Uwarunkowania polskiej polityki energetycznej*. Polityka Energetyczna 2009, **12**, 2, 369–390.
26. Wichliński M., Kobyłecki R., Bis Z.: *Przegląd metod ograniczania emisji rtęci w elektrowniach podczas spalania paliw stałych*. Polityka Energetyczna 2012, **15**, 4, 151–160.
27. Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2010/75/UE z dnia 24.11.2010 w sprawie emisji przemysłowych – Industrial Emission Directive (IED).
28. Strona internetowa Światowej Konwencji Rzęciowej: <http://www.mercuryconvention.org/>
29. Environmental Protection Agency: *National emission standards for hazardous air pollutants from coal- and oil-fired electricity utility steam generating units and standards of performance for fossil-fuel-fired electric utility, industrial-commercial-institutional, and small industrial-commercial-institutional steam generating units*. Final Rule, 2011.
30. Glodek A., Pacyna J.M.: *Mercury emission from coal-fired power plants in Poland*. Atmospheric Environment 2009, **43**, 5668–5673.

* Dr hab. inż. Małgorzata Iwona SZYMKOWSKA, prof. PŁ ukończyła Wydział Chemiczny Politechniki Łódzkiej, kierunek Technologia Chemiczna Nieorganiczna. W 1999 r. uzyskała stopień doktora nauk chemicznych, a w 2008 r. stopień doktora habilitowanego. Pracuje w Instytucie Chemii Ogólnej i Ekologicznej. Zainteresowania naukowe: adsorpcja i kataliza, analiza instrumentalna, chemia sądowa. Jest współautorką 22. rozdziałów w monografiach, ponad 100. publikacji w prasie naukowo-technicznej oraz ponad 260. referatów i posterów na konferencjach krajowych i zagranicznych.

e-mail: malgorzata.szynkowska@p.lodz.pl, tel. 42 631 30 99

Dr Jacek GÓRALSKI jest absolwentem Wydziału Mat-Fiz-Chem Uniwersytetu Łódzkiego (1972), doktorat uzyskał na Wydziale Chemicznym Politechniki Łódzkiej (1981). Pracuje na stanowisku docenta w Instytucie Chemii Ogólnej i Ekologicznej Politechniki Łódzkiej. Jest współautorem 54. publikacji i 132. wystąpień i posterów na konferencjach naukowych polskich i zagranicznych.

e-mail: jacek.goralski@p.lodz.pl, tel.: 42 631 31 06

Dr inż. Elżbieta MAĆKIEWICZ jest absolwentką Wydziału Chemicznego Politechniki Łódzkiej (2006). Obecnie pracuje w Instytucie Chemii Ogólnej i Ekologicznej. Zainteresowania naukowe: adsorpcja i kataliza. Jest współautorką rozdziału w monografii, 13. publikacji w prasie naukowo-technicznej oraz 26. referatów i posterów na konferencjach krajowych i zagranicznych.

e-mail: elzbieta.mackiewicz@p.lodz.pl, tel. 42 631 31 25

Prof. dr hab. inż. Piotr KULA jest absolwentem Wydziału Mechanicznego Politechniki Łódzkiej (1975). Doktorat, wyróżniony Nagrodą Ministra (1982), habilitację (1994) oraz tytuł profesora (2001) uzyskał w Politechnice Łódzkiej. Reprezentuje dyscyplinę naukową Inżynieria Materiałowa. Laureat Nagrody Wojewody Łódzkiego w Kategorii Wynalazek. Obecnie pracuje w Instytucie Inżynierii Materiałowej PŁ. Prorektor PŁ ds. Innowacji. Prezes Polskiego Towarzystwa Materiałoznawczego. Zainteresowania naukowe: inżynieria powierzchni, nanomateriały. Jest autorem 3. monografii, 256. artykułów naukowych i naukowo-technicznych oraz autorem lub współautorem 21. patentów.

e-mail piotr.kula@p.lodz.pl, tel. 42 631 30 30.

Prof. dr hab. inż. Piotr NIEDZIELSKI jest absolwentem Wydziału Mechanicznego Politechniki Łódzkiej (1993). Doktorat w 1998 (Wydział Mechaniczny PŁ), habilitacja w 2006 (Wydział Inżynierii Materiałowej Politechniki Łódzkiej), tytuł profesora 2012 r. Obecnie pracuje w Instytucie Inżynierii Materiałowej PŁ. Zainteresowania: inżynieria powierzchni, materiały węglowe, inżynieria biomedyczna. Jest autorem 2. monografii, 3. rozdziałów w monografiach oraz około 70. artykułów w czasopiśmie naukowych oraz 14. patentów i zgłoszeń patentowych.

e-mail: piotr.niedzielski@p.lodz.pl, tel. 501 218 524.

Dr inż. Robert PIETRASIK jest absolwentem Wydziału Mechanicznego Politechniki Łódzkiej (1994). Doktorat w Instytucie Inżynierii Materiałowej PŁ (2000) wyróżniony nagrodą. Był trzykrotnie wyróżniony za badania i działalność dydaktyczną nagrodą Rektora PŁ. Obecnie pracuje w Instytucie Inżynierii Materiałowej PŁ. Zainteresowania naukowe: obróbka cieplna i cieplno-chemiczna, inżynieria powierzchni, grafen. Jest współautorem 38. artykułów w prasie naukowo-technicznej i autorem lub współautorem 42. referatów i posterów na konferencjach krajowych i zagranicznych oraz 16. patentów krajowych i zagranicznych.

e-mail: robert.pietrasik@p.lodz.pl, tel. 42 631 30 37

Dr hab. inż. Krzysztof JÓŹWIK, prof. PŁ ukończył Wydział Mechaniczny Politechniki Łódzkiej, kierunek mechanika i budowa maszyn. W 1998 roku uzyskał stopień doktora nauk technicznych, a w 2006 roku – stopień doktora habilitowanego nauk technicznych. Obecnie pracuje w Instytucie Maszyn Przepływowych pełniąc funkcję dyrektora. Zainteresowania naukowe: inżynieria biomedyczna, szczególnie modelowanie przepływów krwi, energetyka, konstrukcja maszyn przepływowych. Jest autorem 3. monografii, współautorem 6. rozdziałów w monografiach, ponad 70. publikacji w prasie naukowo-technicznej oraz ponad 60. referatów i posterów na konferencjach krajowych i zagranicznych. Zrealizował ponad 130. prac dla przemysłu.

e-mail: krzysztof.jozwik@p.lodz.pl, tel. 42 631 2367