

Wpływ zanieczyszczeń ropopochodnych na wybrane geologiczno-inżynierskie właściwości gruntów spoistych

Dorota Izdebska-Mucha*



Influence of oil pollution on selected geological-engineering properties of clay soils. Prz. Geol., 53: 766–769.

S u m m a r y. The objective of this study was to investigate the influence of oil pollution on geological-engineering properties of clay soils. Presented results prove that the difference in physical-chemical characteristics of water and oil substances results in unfavourable changes in geological-engineering parameters of the ground soil. Laboratory tests show that the range of change depends on the soil type and the pollutant content. Contaminated area should be then carefully examined when evaluated in the aspect of land development.

Key words: oil pollution, clay soils, geological-engineering parameters

Ropa naftowa i jej pochodne stanowią jedno z głównych źródeł zanieczyszczeń wód i gruntów w Polsce. Postępująca industrializacja i rozwój motoryzacji są przyczyną większego zapotrzebowania na produkty naftowe. Wzrost wydobycia, przetwórstwa i zużycia ropy naftowej nieuchronnie pociąga za sobą zwiększenie przypadków zanieczyszczenia środowiska tymi związkami. Przykładowo w 2002 r. zużyto w Polsce ok. 13 mln ton produktów naftowych, a szacuje się, że w 2010 r. zapotrzebowanie na ropę naftową i jej pochodne wyniesie ok. 27 mln ton (*Rocznik Statystyczny GUS*, 2003; Dyrka, 1997; Korsak, 1998; Surygała, 1999); według danych GIOŚ, w 1998 r. ok. 39% zdarzeń mogących stwarzać nadzwyczajne zagrożenie środowiska stanowiły właśnie różnego rodzaju wycieki produktów naftowych (Warchałowska, 1999). Źródła potencjalnych zanieczyszczeń związkami ropopochodnymi koncentrują się przede wszystkim wokół takich obiektów jak (Surygała & Śliwka, 1999):

- stacje paliw (ponad 6 tys.)
- rafinerie
- rurociągi przesyłowe: rurociąg „Przyjaźń” o długości 1300 km, rurociąg „Pomorski” o długości 237 km, rurociągi produktów finalnych z Płocka do baz magazynowych w Boronowie, Rejowcu, Emilianowie o łącznej długości 1088 km
- bazy magazynowe (ok. 200 baz magazynowych CPN rozmieszczonych na terenie całego kraju)
- bazy przeładunkowe
- tereny przemysłowe i poprzemysłowe
- lotniska
- bazy wojskowe
- torowiska, bocznice kolejowe.

Lokalizację większych obiektów tego typu na terenie Polski przedstawiono na ryc. 1, brak jest jednak szczegółowej inwentaryzacji terenów zanieczyszczonych dla całego kraju. Z uwagi na skalę problemu, szczególnie miejscy zajmują bazy wojskowe byłej Armii Radzieckiej. Obejmowały one obszar 70 tys. ha w 59 obiektach rozmieszczonych głównie w zachodniej i północno-zachodniej części naszego kraju. Szczegółowe badania 21 wytypowanych obiektów o łącznej powierzchni 60 tys. ha, w których stwierdzono możliwość występowania największych szkód ekologicznych wykazały, że „główną

uciążliwością tych obiektów jest zanieczyszczenie gruntu i wód podziemnych produktami ropopochodnymi” (GIOŚ, 1994). Jak podaje raport, zanieczyszczenia gruntu produktami ropopochodnymi udokumentowano na obszarze ok. 406 ha o objętości ok. 18,43 mln m³, z czego 13,24 mln m³ to strefa aeracji, 5,19 mln m³ — strefa saturacji.

Związki ropopochodne stanowią zagrożenie dla życia organizmów żywych i funkcjonowania ekosystemów na terenach skażonych. Wyrazem głębokiej świadomości tego problemu są liczne prace naukowe, konferencje i szkolenia poświęcone zagadnieniom rekultywacji obszarów zdegradowanych. Można stwierdzić, że metody te są stosunkowo dobrze rozwinięte i dla gruntów przepuszczalnych z powodzeniem stosowane. Natomiast remediacja zanieczyszczonych gruntów spoistych jest procesem niezwykle trudnym. Ze względu na wysokie koszty i bariery technologiczne niejednokrotnie rezygnuje się z ich oczyszczania.

Podczas, gdy aspekty środowiskowe zanieczyszczeń naftowych w gruncie są głównym przedmiotem zainteresowania, niewiele jest w literaturze polskiej, jak i zagranicznej opracowań naświetlających wpływ tych związków na geologiczno-inżynierskie właściwości podłoża. Na uwagę zasługuje tu rozprawa doktorska Barańskiego (2000) poświęcona wpływowi czystego benzenu na wytrzymałość i odkształcalność glin lodowcowych.

W niniejszej pracy przedstawiono zmiany wybranych parametrów fizycznych i mechanicznych gruntów spoistych zanieczyszczonych ropą naftową i jej produktami. Zaprezentowane wyniki stanowią syntezę badań własnych autorki, zrealizowanych w ramach pracy doktorskiej (Izdebska-Mucha, 2003) oraz wyników dostępnych w literaturze. Przedstawiony materiał sygnalizuje jedynie wagę problemu i dowodzi konieczności dalszych, szczegółowych badań w tym zakresie.

Fizykochemiczne podstawy interakcji cieczy ropopochodnych z minerałami ilastymi

Ropa naftowa jest mieszaniną węglowodorów o zróżnicowanych właściwościach fizycznych, chemicznych i biologicznych, obok których występują w niewielkiej ilości związki zawierające tlen, azot, siarkę oraz metale ciężkie.

Węglowodory należą do grupy związków organicznych niepolarnych. Ich właściwości fizykochemiczne (tab. 1) determinują rodzaj i intensywność oddziaływań cieczy ropopochodnych z gruntami spoistymi. Niepolarne cząstki węglowodorów wiązane są na powierzchni minerałów ilastych siłami van der Waalsa. Nie wchodzą w prze-

*Wydział Geologii, Uniwersytet Warszawski, al. Żwirki i Wigury 93, 02-089 Warszawa; dim@uw.edu.pl

strzenie międzypakietowe ponieważ nie są w stanie przewyciężyć sił jonowo-elektrostatycznych łączących pakiety, ani też wyprzeć zaadsorbowanej wody (Theng, 1974). Niska wartość stałej dielektrycznej węglowodorów powoduje, że w środowisku cieczy ropopochodnych następuje redukcja grubości podwójnej warstwy dyfuzyjnej wokół cząstki ilowej oraz spadek sił wzajemnego oddziaływania pomiędzy cząstkami gruntowymi. Według obliczeń Kaya (Kaya & Fang, 2000) redukcja sił odpychania jest większa niż sił przyciągania, co wywołuje flokulację cząstek ilowych i tworzenie się agregatów. W wyniku zmniejszenia sił oddziaływań pomiędzy cząstkami gruntowymi grunty kohezyjne nabierają cech gruntów drobnoziarnistych niespoistych.

Charakterystyka wybranych właściwości fizycznych i mechanicznych gruntów spoistych zanieczyszczonych cieczami ropopochodnymi

Badania gruntów spoistych, zanieczyszczonych związkami naftowymi, dowiodły zmiany właściwości fizycznych i mechanicznych tych gruntów, w kierunku mniej korzystnych, z punktu widzenia geologii inżynierskiej. Wyniki badań gruntów skażonych *in situ* oraz sztucznie zanieczyszczonych w laboratorium wskazują, że

wielkość zmian rośnie wraz z zawartością substancji ropopochodnej w gruncie, jak również silniej zaznacza się w gruntach bardziej hydrofilnych.

Skład granulometryczny, gęstość właściwa, gęstość objętościowa. Analiza granulometryczna piasków gliniastych, pyłów i glin pylastych, zawierających objętościowo od 10 do 50% zanieczyszczeń ropopochodnych wykazała, że nastąpiły istotne zmiany w rozkładzie uziarnienia tych gruntów. Odnotowano spadek zawartości frakcji piaskowej (f_p) z ok. 30 do 20%, spadek zawartości frakcji ilowej (f_i) o ok. 10–15% oraz wzrost udziału cząstek pyłowych (Korzeniowska-Rejmer, 2001). W środowisku cieczy organicznych niepolarnych zachodzi prawdopodobnie osłabienie i rozpad mikroagregatów frakcji piaskowej oraz flokulacja cząstek ilowych, wynikająca z redukcji podwójnej warstwy dyfuzyjnej.

W wyniku nasycenia podłoża węglowodorami o gęstości niższej niż woda i adsorpcji cząstek węglowodorów na szkielecie mineralnym gruntu, następuje spadek wartości gęstości objętościowej gruntu (ρ) i gęstości właściwej szkieletu gruntowego (ρ_s). Pył piaszczysty zawierający ok. 28,5% zanieczyszczeń ropopochodnych wykazał o ok. 5% niższą wartość ρ_s i o ok. 20% niższą wartość ρ (Dembicki, 1981); dla gruntów aluwialnych zawie-

Tab. 1. Wartości wybranych parametrów fizycznych wody destylowanej, benzyny i oleju napędowego

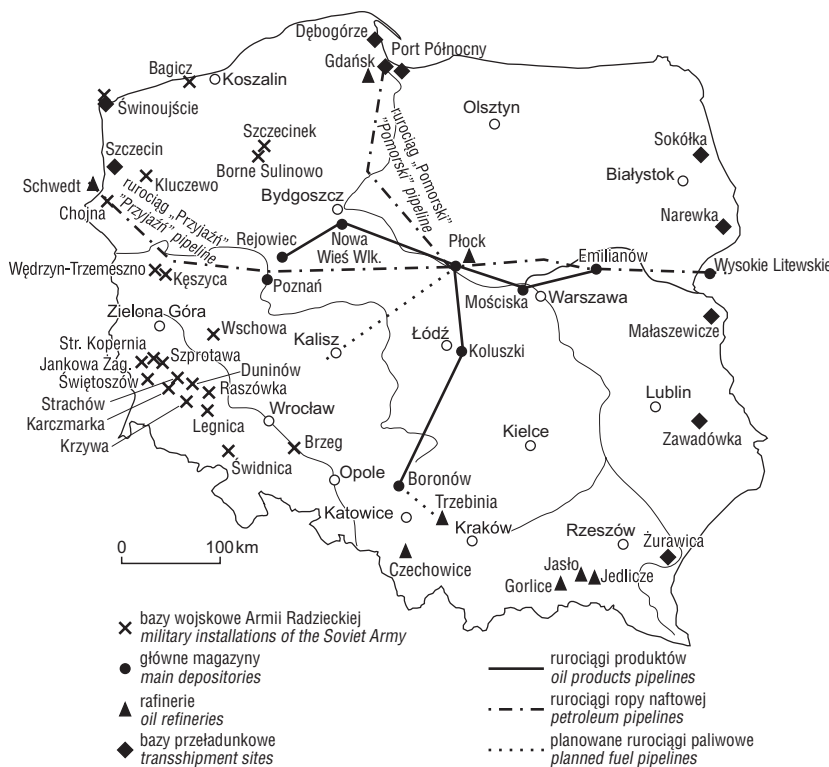
Table 1. Selected physical parameters values of distilled water, petrol and diesel oil

Parametr <i>Parameter</i>	Woda destylowana <i>Distilled water</i>	Benzyna <i>Petrol</i>	Olej napędowy <i>Diesel oil</i>
Gęstość [Mg/m^3] <i>Density</i>	1,00	0,74	0,83
Lepkość kinematyczna [mm^2/s] <i>Kinematic viscosity</i>	1,00	0,49–0,66	1,4–4,7
Rozpuszczalność w wodzie [mg/dm^3] <i>Water solubility</i>	□	131–185	3
Stała dielektryczna [–] <i>Dielectric constant</i>	78,3	1,9–2,2	2,1

Tab. 2. Skurcz liniowy, pęcznienie swobodne, wilgotność pęcznienia różnych typów gruntów spoistych nasyconych: A—wodą destylowaną, B — benzyną, C — olejem napędowym

Table 2. Linear shrinkage, free swelling and swelling moisture of various clay soils saturated with: A—distilled water, B — petrol, C — diesel oil

Typ gruntu <i>Soil type</i>	Skurcz liniowy <i>Linear shrinkage</i> L_s [%]			Pęcznienie swobodne <i>Free swelling</i> FS [%]			Wilgotność pęcznienia <i>Swelling moisture</i> w_f [%]		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C
Bentonit <i>Bentonite</i>	41	1,7	2,1	405	3,9	8,5	400	42,2	43,8
Il illitowy <i>Illitic clay</i>	6,6	2,3	2,6	7,0	3,0	2,3	52,4	38,2	36,3
Kaolinit <i>Kaolinite</i>	3,7	0,8	1,6	1,6	0,3	2,2	56,4	53,3	50,7
Gлина lodowcowa <i>Glacial till</i>	7,0	0	0	4,5	0,7	0,4	34,3	26,0	22,7
Il poznański <i>Clay of the Poznań series</i>	16,7	2,2	1,1	19,6	3,4	2,5	63,3	39,5	34,4



Ryc. 1. Potencjalne źródła zanieczyszczeń podłoża gruntowego ropą naftową i jej produktami w Polsce (Surygała & Śliwka, 1999; GIOŚ, 1994; www.pern.com.pl)
Fig. 1. Potential sources of ground soil pollution with petroleum and its products in Poland (Surygała & Śliwka, 1999; GIOŚ, 1994; www.pern.com.pl)

rajających 12% zanieczyszczeń stwierdzono zmianę ρ_s z 2,68 Mg/m³ do 2,49 Mg/m³ (Srivastawa & Pandey, 1997).

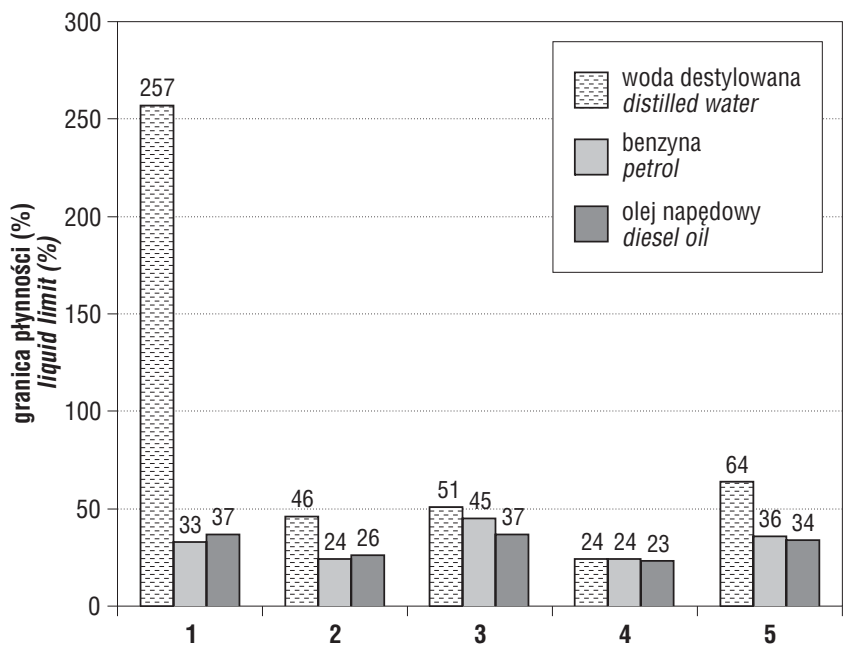
Wartości ρ i ρ_s są podstawą do obliczeń porowatości i wskaźnika porowatości (wg PN-88/B-04481). Zależności empiryczne pomiędzy tymi parametrami oraz zmiana rozkładu uziarnienia gruntu wskazują, że w wyniku nasycenia cieczami ropopochodnymi następuje zmiana porowatości gruntu. Choć brak jest ilościowych danych na ten temat, zaobserwowano występowanie pustek i dużych osiadań dodatkowych w podłożu fundamentów na terenie długotrwanie zanieczyszczonym związkami naftowymi (Korzeniowska-Rejmer, 2001).

Granice konsystencji. W badaniach modelowych ilów monomineralnych: bentonitu z Wyoming (Na-montmorillonit), kaolinitu, iłu illitowego oraz gruntów polimineralnych: gliny lodowcowej i iłu serii poznańskiej (poziom iłu płomienistego) stwierdzono, że sproszkowane grunty spoiste po nasyceniu benzyną i olejem napędowym nie wykazują spoistości (Izdebska-Mucha, 2003). W wyniku próby wałeczowania wszystkie próbki oznaczono jako nieplastyczne. Wartości granicy płynności (w_L) uległy znacznej redukcji w zakresie zależnym przede wszystkim od składu mineralnego badanego gruntu — im materiał bar-

dziej hydrofilny tym większe zaobserwowano zmiany (ryc. 2).

Wartości granic konsystencji odzwierciedlają zdolności sorpcyjne gruntów spoistych względem cieczy nasycających. Ponieważ niepolarne cząstki węglowodorów są wiązane jedynie na zewnętrznych powierzchniach minerałów ilastych, to w badaniach modelowych układu dwufazowego grunt spoisty — ciecz ropopochodna odnotowano gwałtowny spadek w_L i utratę spoistości. W praktyce częściej spotyka się, że w porach gruntu występują zarówno związki ropopochodne, jak i woda. Obecność związków ropopochodnych będzie powodować obniżenie wskaźnika plastyczności i przesunięcie stanu gruntu w kierunku płynnego. Korzeniowska i in. (1995) podają, że w zanieczyszczonym podłożu magazynu oleju mineralnego, wykształconym w postaci gliny pylastej z przewarstwieniami pyłów, piasków, żwirów, nastąpiła zmiana wartości stopnia plastyczności od $I_L = 0,25$ w poziomie posadowienia budynku do $I_L = 0,40-0,50$ w głębszych warstwach. Podwyższenie stopnia plastyczności wraz z głębokością związane jest ze wzrostem zaolejenia gruntu.

Skurcz i pęcznienie. Badania zmian objętościowych gruntów spoistych nasyconych benzyną i olejem napędowym



Ryc. 2. Granica płynności różnych typów gruntów spoistych nasyconych wodą destylowaną, benzyną i olejem napędowym; 1 — bentonit, 2 — il illitowy, 3 — kaolinit, 4 — glina lodowcowa, 5 — il poznański
Fig. 2. Liquid limit chart of various clay soils saturated with distilled water, petrol and diesel oil; 1 — bentonite, 2 — illitic clay, 3 — kaolinite, 4 — glacial till, 5 — Neogene clay of the Poznań series

wym dowiodły, że w układzie z cieczami ropopochodnymi tracą one właściwości ekspansywne. W tab. 2 zestawiono średnie wartości skurczu liniowego (L_s) oraz pęcznienia swobodnego (FS) uzyskane dla różnych typów gruntów. Szczegóły metodyczne przeprowadzonych badań opisano w pracy Izdebskiej-Muchy (2003). Wszystkie analizowane grunty wykazały skrajnie niskie, a zarazem stosunkowo zbliżone wartości L_s i FS przy współdziałaniu z benzyną i olejem napędowym, pomimo dużego zróżnicowania tych parametrów, gdy medium porowym była woda destylowana. Ciekawych informacji dostarcza również analiza wilgotności końcowej próbek po badaniu pęcznienia (w_f). Stwierdzono, że wilgotność pęcznienia w wodzie, benzynie i oleju jest prawie identyczna dla kaolinitu — minerału o niepęczniającej sieci krystalicznej, a najbardziej różni się dla bentonitu, zbudowanego z ekstremalnie ekspansywnego Na-montmorillonitu. Przeprowadzone pomiary potwierdzają niskie zdolności sorpcyjne gruntów spoistych względem cieczy niepolarnych, wynikające z faktu, że cząstki niepolarne nie wchodzą w przestrzenie międzypakietowe minerałów ilastych. Sorpcja tego typu związków zależeć będzie zatem od powierzchni zewnętrznej gruntu, która jest pochodną jego uziarnienia.

Parametry mechaniczne. Badania podłoża gruntowego pod obiektami naftowymi, zanieczyszczonego związkami ropopochodnymi przez okres ok. 50 lat wykazały, że przy 10% zanieczyszczeń nastąpił spadek spójności (c) o ok. 50% oraz redukcja kąta tarcia wewnętrznego (ϕ) i modułu ściśliwości pierwotnej (M_0) o ok. 30–40% (Korzeniowska i in., 1995; Korzeniowska-Rejmer, 2001). Wartości tych parametrów oraz wytrzymałość badanych gruntów na ścinanie (τ) maleją wraz ze stopniem zanieczyszczenia podłoża. Analogiczną tendencję stwierdzili Srivastawa i Pandey (1997) w badaniach gruntu aluwialnego. Podają oni, że przy zawartości 12% oleju mineralnego c gruntu maleje z 76,6 kPa do 50,1 kPa, ϕ zmienia się z 9,16 do 5°, a wskaźnik konsolidacji (C_v) rośnie z 0,118 do 0,147.

Jedną z przyczyn stwierdzonych zmian jest fakt, że ciecze ropopochodne charakteryzują się lepszymi właściwościami zwilżającymi niż woda, ich obecność w gruncie działa jak smar, który zmniejsza tarcie i opór gruntu w procesie jego ścinania. Jednak pogorszenie parametrów wytrzymałościowych i odkształceniowych gruntu, nie wynika z samych tylko właściwości związków ropopochodnych, ale również jest efektem nałożenia się opisanych wyżej zjawisk, które zachodzą w zanieczyszczonym podłożu: obniżenia zdolności sorpcyjnych, redukcji sił wzajemnego oddziaływania i flokulacji cząstek gruntowych, spadku plastyczności gruntu, zmiany jego porowatości.

Podsumowanie

Zanieczyszczenia ropopochodne są szeroko rozpowszechnione w środowisku wodno-gruntowym. Z uwagi na ich odmienną charakterystykę fizyko-chemiczną w sto-

sunku do wody naturalnie nasycającej podłoże, powodują one zmianę właściwości geologiczno-inżynierskich gruntów. Wyniki badań laboratoryjnych dowodzą, że obecność związków ropopochodnych w gruntach spoistych:

- modyfikuje ich uziarnienie i porowatość,
- redukuje plastyczność, skurcz, pęcznienie, wartości gęstości i parametrów wytrzymałościowych,
- zwiększa ściśliwość.

Choć redukcja właściwości ekspansywnych gruntu wydaje się korzystna w ocenie podłoża budowlanego, to nie należy jej traktować w oderwaniu od innych parametrów, które ulegają pogorszeniu. Zakres zmian zależy przede wszystkim od składu mineralnego i granulometrycznego gruntu oraz stopnia jego zanieczyszczenia.

Przedstawione kierunki zmian bezpośrednio wpływają na obniżenie nośności podłoża i wzrost osiadań, zmieniają warunki posadowienia już eksploatowanych obiektów i wskazują na konieczność weryfikacji istniejących opracowań. A zatem ponowna waloryzacja przydatności gruntów do celów budowlanych i ocena stopnia zagrożenia na terenach zanieczyszczonych jest niezbędna przy sporządzaniu ekspertyz dla potrzeb zagospodarowania przestrzennego.

Literatura

- BARAŃSKI M. 2000 — Wytrzymałość i odkształcalność glin lodowcowych zanieczyszczanych ropopochodnym benzenem na terenie Petrochemii Płock S.A. Rozprawa doktorska. Wydział Geologii UW, Warszawa.
- DEMBICKI E. (red.) 1981 — Stateczność pojedynczych fundamentów blokowych oraz słupowych z płytami poprzecznymi. PWN, Warszawa, Poznań.
- DYRKA W. 1997 — Rozwój i zmiany w branży paliwowej w Polsce. Nafta-Gaz, 53: 553–563.
- GŁÓWNY INSPEKTORAT OCHRONY ŚRODOWISKA (GIOŚ) 1994 — Identyfikacja i wycena szkód ekologicznych spowodowanych przez stacjonujące wojska Federacji Rosyjskiej. Raport końcowy. Elwoj-Trio, Warszawa.
- IZDEBSKA-MUCHA D. 2003 — Wpływ benzyny i oleju napędowego na właściwości deformacyjne monomineralnych ilów wzorcowych oraz gruntów spoistych. Rozprawa doktorska. Wydział Geologii UW, Warszawa.
- KAYA A. & FANG H.-Y. 2000 — The effects of organic fluids on physico-chemical parameters of fine-grained soils. Canad. Geotech. J., 37: 943–950.
- KORSAK E. 1998 — Przerób ropy naftowej w Petrochemii Płock S.A. do roku 2000. Nafta-Gaz, 54: 535–541.
- KORZENIOWSKA E., MOTAK E. & RAWICKI Z. 1995 — Wpływ zanieczyszczeń olejowych na stan techniczny podłoża gruntowego i budynku. Przegląd Budowlany, 10: 13–15.
- KORZENIOWSKA-REJMER E. 2001 — Wpływ zanieczyszczeń ropopochodnych na charakterystykę geotechniczną gruntów stanowiących podłoże budowlane. Inżynieria Morska i Geotechnika, 2: 83–86.
- PN-88/B-04481 Grunty budowlane. Badania próbek gruntu. ROCZNIK STATYSTYCZNY GUS, Warszawa 2003.
- SRIVASTAWA R.K. & PANDEY V.D. 1997 — Geotechnical evaluation of oil contaminated soil. Proceedings of GREEN 2. The Second International Symposium on Geotechnics Related to the Environment. Poland, Kraków. Wyd. Thomas Telford, London.
- SURYGAŁA J. & ŚLIWKA E. 1999 — Charakterystyka produktów naftowych w aspekcie oddziaływań środowiskowych. Chemia i Inżynieria Ekologiczna, 6: 131–145.
- SURYGAŁA J. 1999 — Dziś i jutro ropy naftowej. Przemysł Chemiczny, 78: 123–126.
- THENG B.K.G. 1974 — The chemistry of clay-organic reactions. Adam Hilger, London.
- WARCHAŁOWSKA T. 1999 — Analiza zdarzeń mogących spowodować nadzwyczajne zagrożenie środowiska w 1998 r. Informacja GIOŚ, Warszawa.
- www.pern.com.pl Strona domowa Przedsiębiorstwa Eksploatacji Rurociągów Naftowych „Przyjaźń” S.A.