

Tadeusz Szpunar, Paweł Budak  
Instytut Nafty i Gazu, Kraków

## Ilościowe ujęcie zagadnienia usuwania wody z odwiertów gazowych

### Wstęp

W większości przypadków eksploatowane węglowodory gazowe zawierają również składniki ciekłe, które wpływają na zachowanie otworu i jego możliwości wydobywcze. Węglowodory ciekłe obecne w gazie mogą powstawać w wyniku kondensacji cięższych węglodorów, spowodowanej spadkiem ciśnienia i temperatury podczas przepływu gazu na powierzchnię w kolumnie eksploatacyjnej. Również sam gaz może zawierać cząsteczki wody złożowej wykraplającej się z pary wodnej, która może być jednym z jego składników. Woda może być obecna w gazie także w wyniku porywania cząsteczek wody z warstw podścielających złożo gazowe.

Gdy energia gazu płynącego w kolumnie eksploatacyjnej nie jest wystarczająco duża do wynoszenia cząsteczek cieczy na powierzchnię, gromadzą się one na dnie odwiertu, a ciśnienie hydrostatyczne słupa nagromadzonej cieczy

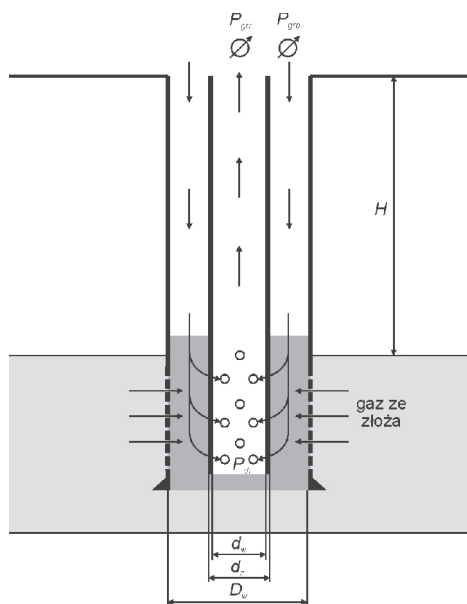
może ograniczać wielkość wydobycia. W przypadku odwiertów o niskim ciśnieniu złożowym gromadzenie się cieczy na spodzie jest w stanie zupełnie zatrzymać wydobycie, gdy ciśnienie hydrostatyczne wzrośnie do odpowiednio wysokiego poziomu. W przypadku odwiertów o wyższym ciśnieniu złożowym ciśnienie hydrostatyczne słupa cieczy przeciwdziałające ciśnieniu złożowemu ogranicza wielkość wydobycia gazu, zaburza wyniki interpretacji testów otworowych, utrudnia ocenę wykładnika gazowo-wodnego itp. Gromadzenie się cieczy na spodzie odwiertu jest częstym powodem niewielkiego wydobycia gazu ze złoża o niskim ciśnieniu złożowym lub o niewielkiej przepuszczalności. Gdy stwierdzone zostanie gromadzenie się cieczy na spodzie, każde działanie powodujące ograniczenie jej ilości spowoduje wzrost natężenia dopływu gazu do odwiertu i poprawę jego produktywności.

### Usuwanie wody metodą nagazowania przez zatłaczanie gazu do przestrzeni pierścieniowej otworu

Rozpatrujemy sytuację pokazaną schematycznie na rysunku 1.

Zakładamy, że na spodzie odwiertu gazowego doszło do nagromadzenia wody złożowej w ilości ograniczającej wydobycie. W odwiercie tym gaz eksploatowany był przez kolumnę eksploatacyjną bez pakera. W celu usunięcia wody do odwiertu zapuszczono rury wydobywcze, których dolny odcinek sperforowany był na długości kilku-, kilkunastu metrów w taki sposób, aby znalazł się on możliwie głęboko pod powierzchnią wody. Otwory w rurach powinny być rozmieszczone równomiernie na długości odcinka perforowanego, a ich sumaryczną powierzchnię można określić z warunku utrzymania pomijalnie ma-

łych strat ciśnienia przy przepływie gazu, na przykład, aby nie przekraczały one 0,1 MPa. Zadaniem otworów perforacyjnych jest równomierne rozprowadzanie gazu zatłaczanego do odwiertu przez przestrzeń pierścieniową, nagazowanie nagromadzonej wody i usunięcie jej przez gaz wypływający z zapuszczonych rur wydobywczych. Gaz do przestrzeni pierścieniowej odwiertu doprowadzany jest z sąsiadujących, wysoko wydajnych odwiertów. Znane jest ciśnienie gazu doprowadzanego do przestrzeni  $P_{grp}$ , które może zmieniać się w pewnych granicach w wyniku dynamicznych zmian sytuacji w otworze. Ciśnienie gazu na głowicy zapuszczonych rurek wydobywczych  $P_{gr}$  jest również znane i może być równe atmosferycznemu lub



Rys. 1. Usuwanie wody złożowej nagromadzonej na spodzie odwiertu gazowego

można je regulować w przypadku kierowania gazu do separatora. O ile długość sperforowanego odcinka rur oraz ich średnicę można wybrać na podstawie wysokości słupa nagromadzonej wody oraz doświadczenia inżynierskiego, o tyle sumaryczną powierzchnię otworków można określić w sposób przybliżony. Dla niewielkich spadków ciśnienia  $\Delta p$  [kPa] przy przepływie gazu o gęstości  $\rho$  [kg/l] z wydajnością  $Q$  [l/min] przez otwór okrągły o powierzchni  $A$  [cm<sup>2</sup>] możemy napisać [1]:

$$\Delta p = \frac{1}{2959,41} \cdot \frac{\rho \cdot Q^2}{C^2 \cdot A_o^2} \quad (1)$$

Przyjmując zatem na przykład  $\Delta p = 0,01$  MPa, otrzymujemy z (1) dla współczynnika  $C = 0,95$ , po przeliczeniu na jednostki układu SI:

$$A = 1,554 \cdot 10^{-3} \cdot Q_d \cdot \sqrt{\rho_g} \quad (2)$$

We wzorze (2)  $Q_d$  oznacza wydatek gazu przeliczony na warunki denne.

Ustalając przykładowo  $Q_d = 3$  m<sup>3</sup>/min,  $\rho = 81$  kg/m<sup>3</sup>, otrzymamy z (2)  $A = 340$  mm<sup>2</sup>, co odpowiada np. 110 otworkom o średnicy 2 mm każdy, rozmieszczonym równomiernie na długości sperforowanego odcinka rur.

Z wzoru (2) wynika, że powierzchnia otworków, przy której spadek ciśnienia gazu można uznać za pomijalnie mały, zależy od natężenia przepływu gazu w warunkach dennych  $Q_d$ , a zatem od ciśnienia dennego (czyli ciśnienia na przestrzeni  $P_{grp}$  i na rurkach  $P_{grr}$ ), temperatury, jak również od gęstości gazu  $\rho$ , która również zależy od ciśnienia dennego i temperatury, a zatem ciśnienia gło-

wicowego i natężenia przepływu, które z kolei zależne jest od oporów przepływu gazu w otworze, a zatem jego konstrukcji. Wynikałoby stąd, że dla każdego przypadku należałoby dobierać inne  $A$ , to znaczy wykonywać inne zestawy otworków, co byłoby niecelowe i praktycznie niemożliwe. Liczbę i rozmieszczenie otworków należy zatem dobrać w sposób empiryczny, posługując się wyczuwaniem inżynierskim i doświadczeniem oraz starając się, aby dopływ gazu do wnętrza rur wydobywczych miał miejsce na całej długości sperforowanego odcinka.

W przypadku zatłaczania gazu do przestrzeni opory przepływu odejmują się od ciśnienia dennego ruchowego i obowiązywać będzie wzór następujący [3]:

$$P_{dr}^2 = P_{grp}^2 \cdot e^s - 27,78 \frac{G \cdot \bar{T} \cdot \bar{Z} \cdot \bar{f} \cdot H \cdot (e^s - 1) \cdot Q_{N1}^2}{D_e^5 \cdot S} \quad (3)$$

gdzie

$$S = \frac{0,03749 \cdot G \cdot H}{\bar{Z} \cdot \bar{T}} \quad (4)$$

Ciśnienie denne ruchowe obliczane na podstawie znajomości ciśnienia głowicowego na rurach wydobywczych wyrazić można natomiast wzorem:

$$P_{dr}^2 = P_{grr}^2 \cdot e^s + 27,78 \cdot \frac{G \cdot \bar{T} \cdot \bar{Z} \cdot \bar{f} \cdot H \cdot (e^s - 1) \cdot Q_{N2}^2}{d_w^5 \cdot S} \quad (5)$$

gdzie  $Q_{N1}$  i  $Q_{N2}$  – natężenie przepływu gazu odpowiednio w przestrzeni pierścieniowej i w rurach wydobywczych.

Natężenia przepływu przyjęte we wzorach (3) i (5) nie są równe, gdyż do otworu dopływa również gaz ze złoża  $Q$ . Wielkość tego dopływu można określić na podstawie znajomości współczynników  $a$  i  $b$  formuły dwuczłonowej, które są znane praktycznie dla każdego otworu gazowego, i znajomości ciśnienia dennego ruchowego  $P_{dr}$ . Obowiązuje zależność:

$$P_o^2 - P_{dr}^2 = a \cdot Q + b \cdot Q^2 \quad (6)$$

Natężenie gazu wypływającego z rur wydobywczych  $Q_{N2}$  równe jest oczywiście sumie natężenia gazu zatłaczanego do przestrzeni  $Q_{N1}$  i natężenia gazu wypływającego ze złoża  $Q$ . Równania (3), (5) i (6) stanowią układ równań, z którego możliwe jest obliczenie  $Q_{N1}$ ,  $Q_{N2}$  oraz  $P_{dr}$ . Jednak w celu uzyskania prostych zależności analitycznych umożliwiających określenie ciśnienia dennego ruchowego pomocnego do dalszych obliczeń dla danych  $P_{grp}$  i  $P_{grr}$  zakładamy, że  $Q_{N1} \cong Q_{N2} = Q_N$  i  $Q = 0$ , co oznacza, że gaz ze złoża nie bierze udziału w usuwaniu wody.

Przyjmując takie założenia, nie popełniamy dużego błędu, gdyż wydajność otworów, w których gromadzi się woda, jest na ogół mała i wzrost ciśnienia dennego ruchowego w wyniku zatłaczania gazu do przestrzeni jeszcze ją obniża, a w niektórych przypadkach w ogóle eliminuje. Przyjmując  $Q_{N1} = Q_{N2} = Q_N$  i przyrównując wzory (3) i (5), jako że ciśnienie dennego ruchowe liczone na podstawie  $P_{gr}$  i  $P_{grp}$  musi być jednakowe, otrzymamy:

$$Q_N = \sqrt{\frac{(P_{grp}^2 - P_{gr}^2) \cdot e^s \cdot S \cdot D_e^5 \cdot d_w^5}{27,78 \cdot G \cdot \bar{T} \cdot \bar{Z} \cdot \bar{f} \cdot H \cdot (e^s - 1) \cdot (d_w^5 + D_e^5)}} \quad (7)$$

a znając  $Q_N$ , możemy obliczyć  $P_{dr}$  z wzoru (3) lub (5). Dla celów dalszych rozważań obliczone natężenie przepływu  $Q_N$  [ $\text{Nm}^3/\text{min}$ ] przeliczamy na równoważne mu natężenie  $Q_d$  [ $\text{m}^3/\text{min}$ ] w warunkach złożowych (w miejscu wpływu gazu do rurek) za pomocą wzoru:

$$Q_d = 3,734 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{\bar{Z} \cdot \bar{T}}{P_{dr}} \cdot Q_N \quad (8)$$

Praca wykonana przez gaz na spodzie odwiertu, której celem jest wynoszenie nagromadzonej w otworze wody, równa jest energii kinetycznej gazu w miejscu wpływu do rurek. Energia ta spożytkowana zostaje do wynoszenia na powierzchnię masy  $m_w$  wody, czyli na wykonanie pracy w polu oddziaływania sił grawitacji. Na podstawie równoważności pracy i energii możemy napisać:

$$\frac{1}{2} \cdot m_g \cdot V_g^2 = m_w \cdot g \cdot H \quad (9)$$

gdzie  $m_g$  to masa gazu o prędkości  $V_g$  i energii koniecznej do wynoszenia masy  $m_w$  na wysokość  $H$  równą głębokości otworu.

Masę gazu wpływającego do rurek na spodzie odwiertu w jednostce czasu można wyrazić wzorem:

$$m_g = Q_d \cdot \rho_g \cdot t \quad (10)$$

natomiast prędkość gazu w miejscu wpływu do rurek równa jest:

$$V_g = \frac{Q_d}{A} \quad (11)$$

gdzie  $A$  [ $\text{m}^2$ ] jest to pole powierzchni przelotu rurek zapuszczonych w celu usunięcia wody.

Podstawiając (11) i (10) do (9), otrzymamy:

$$\frac{1}{2} \cdot \rho_g \cdot t \cdot \frac{Q_d^3}{A} = m_w \cdot g \cdot H \quad (12)$$

Różniczkując (12) względem  $t$ , otrzymujemy:

$$\frac{dm_w}{dt} = \frac{\rho_g \cdot Q_d^3}{2 \cdot A^2 \cdot g \cdot H} \quad (13)$$

a po przeliczeniu jednostek otrzymamy ostatecznie:

$$\frac{dm_w}{dt} = 2,2933 \cdot 10^7 \cdot \frac{\rho_g \cdot Q_d^3}{d_w^4 \cdot H} \quad (14)$$

Wyrażenie (14) opisuje prędkość usuwania wody przez gaz zatłaczany do przestrzeni pierścieniowej otworu wpływający przez rurki wewnętrzne.

Gęstość gazu  $\rho_g$  [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ] można obliczyć w prosty sposób, znając ciśnienie dennego ruchowe w miejscu wpływu gazu do rurek:

$$\rho_g = 1,2 \cdot 10^2 \cdot \frac{P_{dr} \cdot M_g}{Z(P_{dr}, \bar{T}) \cdot \bar{T}} \quad (15)$$

gdzie:

$M_g$  – masa cząsteczkowa gazu,

$Z$  – współczynnik ściśliwości,

$P_{dr}$  – ciśnienie dennego ruchowe,

$T$  – temperatura w miejscu wpływu do rurek.

Prędkość przepływu gazu w rurekach

$$V_g = \frac{Q_d}{A} \quad (16)$$

lub

$$V_g = 1,2739 \cdot 10^6 \cdot \frac{Q_d}{d_w^2} \quad (17)$$

nie może być mniejsza od granicznej prędkości gazu zapewniającej wynoszenie, podanej np. w pracy [2]:

$$V_t = 1,944 \cdot 10^2 \cdot \sqrt[4]{\frac{\rho_w - \rho_g}{\rho_g^2}} \quad (18)$$

Przedstawione rozważania umożliwiają również określenie zawartości wody w gazie wypływającym z otworu. Odpowiedni wzór ma postać [3]:

$$K = 10^3 \cdot \frac{dm_w / dt}{Q_N} \quad (19)$$

Podsumowując, przy przyjętych założeniach przedstawiony model umożliwia obliczenie dla różnego ciśnienia tłoczenia gazu do przestrzeni oraz ciśnienia dławienia gazu na rurach wydobywczych:

- natężenia przepływu gazu zatłaczanego do przestrzeni pierścieniowej,
- ciśnienia dennego ruchowego,
- minimalnego i aktualnego natężenia przepływu gazu

zatlaczanego do przestrzeni pierścieniowej zapewniającego wynoszenie cieczy,

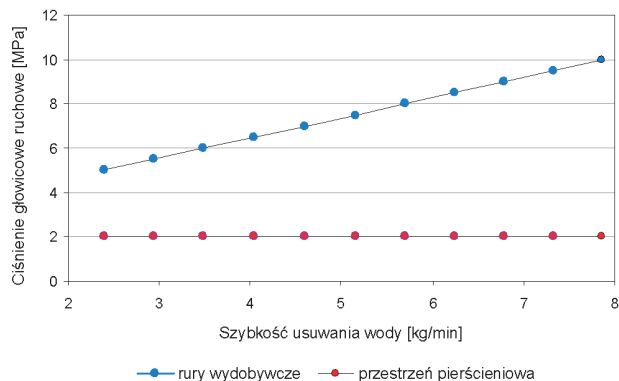
- szybkości usuwania wody/kondensatu z odwiertu,
- zawartości cieczy w wypływającym gazie,
- sugerowanej powierzchni otworów do nagazowywania cieczy wykonanych w rurkach.

Na rysunkach od 2 do 4 przedstawiono graficznie wyniki przykładowych obliczeń. W celach poglądowych skonstruowano wykres zależności ciśnienia głowicowego ruchowego w przestrzeni pierścieniowej ( $P_{grp}$ ) i w rurach wydobywczych ( $P_{grr}$  – założone ciśnienie odbioru gazu z odwiertu) od szybkości usuwania wody/kondensatu (rysunek 2) oraz wykresy zależności szybkości usuwania wody od jej zawartości w wynoszonym gazie (rysunek 3) i od natężenia przepływu gazu (rysunek 4) przy ciśnieniach głowicowych podanych na rysunku 2. Do obliczeń przyjęto stałe ciśnienie głowicowe ruchowe  $P_{grr}$  na wypływie z rur wydobywczych.

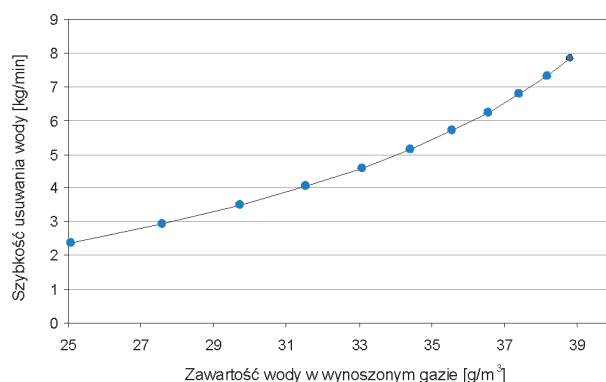
Oczywiście, wykorzystując możliwości modelu, możliwe jest skonstruowanie innych wykresów, na przykład zależności ciśnienia głowicowego ruchowego od zawartości wody/kondensatu w wypływającym gazie lub od natężenia przepływu gazu zatlaczanego do przestrzeni pierścieniowej itp.

**Oznaczenia:**

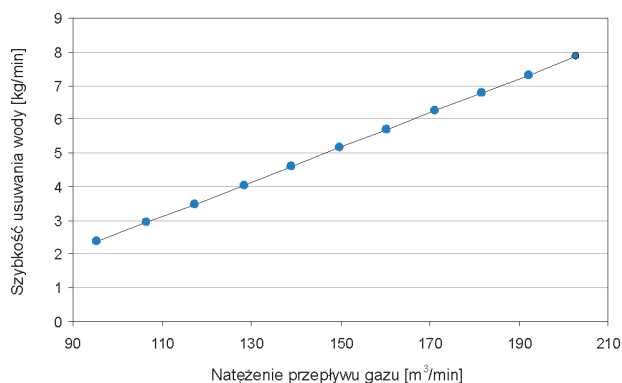
- $Q_g$  – natężenie przepływu gazu w warunkach standardowych [ $Nm^3/min$ ],
- $Q_d$  – natężenie przepływu gazu w warunkach dennych [ $m^3/min$ ],
- $A$  – powierzchnia otworów, przez które odbywa się przepływ [ $m^2$ ],
- $P_o$  – ciśnienie złożowe [MPa],
- $P_{dr}$  – ciśnienie denne ruchowe [MPa],
- $P_{grp}$  – ciśnienie głowicowe ruchowe na przestrzeni [MPa],
- $P_{grr}$  – ciśnienie głowicowe ruchowe na rurach wydobywczych [MPa],
- $G$  – gęstość względna gazu [ułamek],
- $\rho_g$  – gęstość gazu [ $kg/m^3$ ],
- $\rho_w$  – gęstość wody złożowej [ $kg/m^3$ ],
- $M_g$  – masa cząsteczkowa gazu [ $kg/Kmol$ ],
- $\bar{Z}$  – współczynnik ściśliwości [bezwymiarowy],
- $\bar{T}$  – temperatura złożowa [ $^{\circ}K$ ],
- $H$  – głębokość (dolnego rzędu otworków w rurach wydobywczych) [m],
- $d_w$  – średnica wewnętrzna rur wydobywczych [mm],
- $d_z$  – średnica zewnętrzna rur wydobywczych [mm],
- $D_e$  – średnica ekwivalentna [mm],
- $m_g$  – masa gazu [kg],
- $m_w$  – masa wody złożowej [kg],



Rys. 2. Zależność szybkości usuwania wody złożowej od ciśnienia głowicowego ruchowego ( $P_{grp}$  i  $P_{grr}$ )



Rys. 3. Zależność szybkości usuwania wody od jej zawartości w wynoszonym gazie dla wartości  $P_{grp}$  i  $P_{grr}$  podanych na rysunku 2



Rys. 4. Szybkość usuwania wody/kondensatu w funkcji natężenia przepływu gazu dla wartości  $P_{grp}$  i  $P_{grr}$  podanych na rysunku 2

- $V_g$  – prędkość przepływu gazu [m/min],
- $V_t$  – graniczna prędkość przepływu gazu zapewniająca wynoszenie wody [m/min],
- $K$  – zawartość wody złożowej w gazie wypływającym z odwiertu [ $g/Nm^3$ ],
- $\bar{f}$  – średni współczynnik tarcia [bezwymiarowy],
- $t$  – czas [minuty],
- $g$  – stała grawitacji [ $m/min^2$ ],
- $dm_w/dt$  – prędkość usuwania wody [kg/min].

## Literatura

- [1] *Drilling Data Handbook*. Francuski Instytut Naftowy. Wyd. 7. Paryż 1999.
- [2] Szpunar T., Budak P.: *Opracowanie metody usuwania wody z odwiertów gazowych metodą nagazowania*. Dok. INiG, Kraków 2011.
- [3] Turner R.G., Hubbland M.G. i in.: *Analysis and Prediction of Minimum Flow Rate for the Continuous Removal of Liquids from Gas Wells*. Journal of Petroleum Technology, 1979.



Dr inż. Tadeusz SZPUNAR – adiunkt w Zakładzie Inżynierii Naftowej Instytutu Nafty i Gazu w Krakowie. Autor szeregu opracowań z zakresu inżynierii złożowej, eksploatacji, wiertnictwa, magazynowania gazu w kawernach solnych, zagadnień związanych z mechaniką górotworu oraz innych. Autor i współautor kilkudziesięciu publikacji naukowych oraz patentów.



Mgr inż. Paweł BUDAK – starszy specjalista naukowo-badawczy w Zakładzie Inżynierii Naftowej INiG w Krakowie. Zajmuje się realizacją prac naukowych i naukowo-badawczych; głównie z zakresu inżynierii złożowej, wiertnictwa i eksploatacji podziemnych magazynów gazu w kawernach solnych oraz tworzeniem oprogramowania na potrzeby przemysłu naftowego i gazowniczego.

## ZAKŁAD INŻYNIERII NAFTOWEJ

- analiza przyczyn oraz badania stopnia uszkodzenia skał zbiornikowych w strefie przyotworowej;
- ocena głębokości infiltracji fazy ciekłej do skał zbiornikowych;
- pomiary parametrów reologicznych cieczy i niektórych ciał stałych w zakresie temperatur  $-40$  do  $200^{\circ}\text{C}$  oraz ciśnień do 150 bar;
- badania oraz dobór cieczy roboczych i solanek do prac związanych z opróbowaniem i rekonstrukcją odwiertów;
- monitorowanie, prognozowanie i wykrywanie stref anomalnie wysokich ciśnień porowych i złożowych w profilach wierconych i projektowanych otworów wiertniczych;
- ocena stateczności ścian otworów wiertniczych;
- określanie zdolności produkcyjnej odwiertów;
- symulacja eksploatacji kawernowych podziemnych magazynów gazu w wysadach solnych, z uwzględnieniem konwergencji komór;
- zastosowanie technologii mikrobiologicznych do stymulacji odwiertów oraz usuwania osadów parafinowych w odwiertach i instalacjach napowierzchniowych;
- fotograficzne i internetowe dokumentowanie rdzeni wiertniczych;
- określanie właściwości mechanicznych oraz sejsmoakustycznych skał w próbach okruczowych;
- analiza zjawisk migracji i ekshalacji gazu ziemnego oraz występowania ciśnień w przestrzeniach międzyrurowych;
- modelowanie obiektów złożowych i opracowywanie specjalistycznego oprogramowania z zakresu inżynierii naftowej.

**Kierownik:** mgr inż. Paweł Budak

**Adres:** ul. Lubicz 25A, 31-503 Kraków

**Telefon:** 12 421-00-33 w. 281

**Faks:** 12 430-38-85

**e-mail:** pawel.budak@inig.pl

