

Wiesław Szott, Krzysztof Miłek

Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy

Metodyka wyznaczenia korelacji wybranych wielkości eksploatacyjnych z parametrami złożowymi dla odwiertów udostępniających formacje łupkowe

W pracy przedstawiono metodykę wyznaczania korelacji wybranych wielkości eksploatacyjnych z parametrami złożowymi dla odwiertów udostępniających formacje łupkowe. Opiera się ona na statystycznej analizie dużego zbioru wariantów symulacyjnych, traktowanego jako schemat eksperymentów numerycznych, zgodnej z koncepcją tzw. *experimental design*. Uzyskane korelacje mogą być wykorzystane do znalezienia efektywnego rozwiązania problemu odwrotnego w procesie kalibracji złożowych modeli formacji łupkowych.

Słowa kluczowe: formacje łupkowe, symulacje złożowe, eksperymenty numeryczne, projektowany eksperyment.

Methods to determine correlations between production data and formation geological and well completion parameters for stimulated wells producing from shale gas formations

The paper presents a method to determine effective correlations between production data and formation parameters of shale gas formations produced by horizontal, stimulated wells. The method is based upon the statistical analysis of a large collection of simulation models treated as a scheme of numerical experiments and using the so-called experimental design approach. The resultant correlations may be used to effectively solve the inverse problem of formation model calibration.

Key words: shale formations, reservoir simulations, numerical experiments, experimental design.

Wstęp

Praca stanowi kolejny etap opracowań zrealizowanych w ramach projektu Blue Gas pt. *Opracowanie optymalnych koncepcji zagospodarowania złóż niekonwencjonalnych z uwzględnieniem aspektów środowiskowych, zadanie 2: Optymalizacja rozwiercania złóż niekonwencjonalnych w procesie ich zagospodarowania poprzez dobór gęstości siatki odwiertów*, mających na celu określenie gęstości siatki odwiertów efektywnie eksploatujących gazowe formacje łupkowe o typowych parametrach formacji krajowych. Problem ten sprowadzony został do wyznaczenia wielkości obszaru drenażu pojedynczego typowego odwiertu poziomego eksploatującego formację w wyniku zabiegu wielosekcyjnego szczelinowania hydraulicznego. Jego rozwiązanie podzielono na następujące etapy:

1. Określenie wielkości obszaru drenażu w zależności od parametrów geologicznych formacji łupkowej oraz cha-

- rakterystyki jej udostępnienia – metodyka tego etapu została przedstawiona w pracy P. Kaszy [1];
2. Określenie istotnych parametrów formacji łupkowych i ich udostępnienia w sytuacji braku kompletnych danych pomiarowych, poprzez wykorzystanie danych eksploatacyjnych (z produkcji wstępnej, testów otworowych) i rozwiązanie tzw. problemu odwrotnego. Temu etapowi poświęcona jest niniejsza praca, stanowiąca opis metodyki określenia korelacji pomiędzy parametrami formacji a wynikami eksploatacji;
 3. Konstrukcja praktycznych narzędzi operatorskich umożliwiających szybko i efektywnie szacowanie wielkości drenażu pojedynczego odwiertu eksploatującego formację łupkową scharakteryzowaną częściowo poprzez bezpośrednie pomiary właściwości geologicznych forma-

cji oraz podstawowe parametry technologiczne odwiertu i jego udostępnienia uzupełnione o dane niepodlegające bezpośredniemu pomiarowi, ale wyznaczone pośrednio, jako mające wpływ na wyniki eksploatacyjne i określone poprzez rozwiązania zagadnienia odwrotnego. Do osiągnięcia tego celu w pracy zastosowano metody korelacji pomiędzy parametrami formacji i jej udostępnieniami a wynikami eksploatacji.

Ze względu na ograniczony szczegółowy zakres danych eksploatacyjnych z krajowych formacji, w pracy wykorzystano

no ogólne informacje o tych formacjach (tj.: zakres uzyskiwanych wielkości *flowbacku* [1], zakres maksymalnych wydajności wypływu gazu, objętość wody zatłoczonej na pojedynczą sekcję szczelinowania oraz ich liczbę, parametry geologiczne matrycy i inne [4]). Jako podstawowe narzędzie prowadzonych analiz zastosowano symulacje procesu eksploatacji formacji łupkowych na modelach uwzględniających powyższy zakres danych, zgodnie z ogólnie przyjętym schematem modelowania takich formacji [3, 8, 6]. Symulacje te przeprowadzono przy pomocy komercyjnego symulatora Eclipse 300 [5].

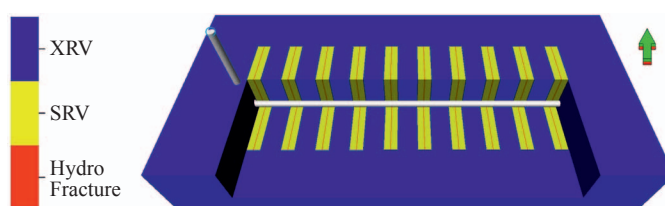
Ogólna charakterystyka modeli symulacyjnych

Analizę korelacyjną przeprowadzono dla zbioru modeli o następujących ogólnych właściwościach:

- geometria formacji – założono strefę oddziaływania pojedynczego odwiertu poziomego o stałej miąższości oraz regularnym kształcie,
- jednorodność formacji – przyjęto pierwotne (przed udostępnieniem) właściwości jako jednorodne (średnie),
- pierwotne właściwości transportowe – w ogólności założono układ o podwójnej przepuszczalności i porowatości (matryca + szczeliny) – ewentualna szczelinowatość matrycy odpowiadała szczelinom nieefektywnym (zabliźnionym), których udział w transporcie płynów złożowych w postaci szczelinowatości wtórnej powstał w wyniku procesu stymulacji strefy przyodwiertowej (tzw. obszar SRV [2]), natomiast w obszarze niestymulowanym (zwanym XRV) przepływ odbywa się tylko matrycą,
- płyny złożowe – uwzględniono obecność płynu szczelinującego (wody) oraz gazu o stałym składzie (metan) – założono ewentualną obecność wody złożowej w postaci fazy niemobilnej,
- udostępnienie – przyjęto obecność wielokrotnych sekcji szczelinowania, każda odpowiadała pojedynczej głównej hydroszczelinie oraz powstałemu wokół niej obszarowi szczelin wtórnych o regularnym kształcie (obszary SRV). Obszary SRV scharakteryzowano pod względem transportu płynów złożowych jako systemy podwójnej porowatości i przepuszczalności,
- warunki początkowe – równowagowe ciśnienie złożowe (P_{ini}) i stała temperatura złożowa (T_{res}),
- warunki brzegowe – stałe ciśnienie na spodzie odwiertów (P_{bhp}).

Ogólny widok modelu z zaznaczonymi obszarami XRV, SRV oraz odwiertem pokazano na rysunku 1.

W modelu założono zasadniczo przepływy dwufazowe. W szczególności dotyczy to przepływów w hydroszczelinach oraz szczelinach wtórnych w obszarze SRV, dla których założono przepuszczalności względne wody i gazu będące li-



Rys. 1. Widok modelu formacji łupkowej udostępnionej stymulowanym odwiertem poziomym

niowymi funkcjami ich nasycień. Natomiast przepływy wewnątrz matrycy (zarówno w obszarze XRV, jak i SRV) oraz przepływy z matrycy do szczelin (w obszarze SRV) są efektywnie jednofazowe (tylko gaz). Wynika to z potrzeby skutecznego modelowania obserwowanego zjawiska częściowego odzysku zatłoczonej wody (płynu szczelinującego), wyrażonego tzw. *flowbackiem* mniejszym od jedności, poprzez obecność zatłoczonej wody uwięzionej w matrycy SRV. Kompletna lista parametrów modelu obejmuje:

- długość odcinka poziomego odwiertu (L_w),
- liczba sekcji hydroszczelinowania (n_f),
- miąższość formacji (H),
- parametry matrycy skalnej: porowatość (ϕ_m), przepuszczalność (k_m), nasycenie gazem resztkowym (S_{ger}), nasycenie nieredukowalnej wody (S_{wcr}), przepuszczalność względna dla gazu (k_{rg}) parametry hydroszczelin: długość (L_{hf}), przewodność (T_{hf}), porowatość (ϕ_{hf}),
- parametry szczelin wtórnych: porowatość (ϕ_f), przepuszczalność (k_f), parametr sprężenia matryca-szczeliny (σ), skorelowany w standardowy sposób z gęstością szczelin, nasycenie wodą nieredukowalną (S_{wcr}),
- szerokość obszaru SRV wokół hydroszczeliny (d_{SRV}),
- ciśnienie początkowe (P_{ini}),
- temperatura złożowa (T_{res}),
- ciśnienie na spodzie odwiertu (P_{bhp}).

Ponieważ niektóre z powyższych parametrów dla początkowych założeń modelowych występują jedynie w określonych kombinacjach, dlatego można stosować parametry efektywne. W szczególności dotyczy to parametrów matrycy:

- efektywna porowatość w obszarze XRV, $\phi_{m,XRV}$ – porowatość całkowita zredukowana o niemobilną, pierwotną wodę złożową;
- ułamek porowatości efektywnej matrycy obszaru SRV zajęty wodą zatłoczoną (płynem szczelinującym na bazie wody), $S_{w,m}$ – nasycenie wodą zatłoczoną w matrycy strefy SRV – zgodnie z podanym wyżej założeniem woda ta jest uwięziona w matrycy, co jednoznacznie określa efektywną porowatość dla gazu w obszarze SRV wzorem: $\phi_{m,SRV} = \phi_{m,XRV} \cdot (1 - S_{w,m})$;
- efektywna przepuszczalność dla gazu w matrycy obszaru XRV, $k_{g,m,XRV}$, uwzględniająca obecność niemobilnej, pierwotnej (związanej) wody złożowej w matrycy i w konsekwencji zredukowana w stosunku do przepuszczalności bezwzględnej matrycy;
- efektywna przepuszczalność dla gazu w matrycy obszaru SRV, $k_{g,m,SRV}$, uwzględniająca obecność niemobilnej wody zatłoczonej i w konsekwencji zredukowana w stosunku do przepuszczalności w matrycy obszaru XRV – jako równoważnego parametru w poniższej analizie użyto ilorazu $\frac{k_{g,m,SRV}}{k_{g,m,XRV}}$.

Uwaga: ze względu na stałość nasyceń płynami złożowymi w matrycy, a w konsekwencji stałość przepuszczalności względnych, iloraz powyższy nie zmienia się w trakcie eksploatacji.

- ze względu na dominującą w obszarze SRV rolę przepływów gazu pomiędzy matrycą a szczelinami, w porównaniu z przepływami wewnątrz matrycy – co sprawdzono dla szerokiego zakresu parametrów modeli – pominięto niezależny wpływ parametru sprzężenia matryca–szczelina, zakładając, że parametr ten modyfikuje efektywną przepuszczalność $k_{g,m,SRV}$;
- parametry hydroszczelin: długość (L_{hf}), przewodność (T_{hf}), porowatość (ϕ_{hf}) – założono stałą wartość porowatości po uprzednim potwierdzeniu pomijalnego jej wpływu na wyniki symulacji);
- parametry szczelin wtórnych: porowatość całkowita (ϕ_f), przepuszczalność bezwzględna (k_f);
- szerokość obszaru SRV wokół hydroszczeliny (d_{SRV} [m]);
- miąższość formacji (H [m]);
- ciśnienie początkowe (P_{ini} [bar]);
- ciśnienie na spodzie odwiertu (P_{bhp} [bar]).

Dla powyższych parametrów ustalono zakres ich zmienności obejmujący, według wiedzy autorów, wartości parametrów złożowych i parametrów charakteryzujących udostępnienia krajowych formacji łupkowych.

W prezentowanym przypadku pominięto zależność wyników modelowania od parametrów desorpcji. Powyższe parametry modelu w dalszej części artykułu zostały określone jako modyfikatory, zgodnie z ogólnie przyjętą nomenklaturą.

Tablica 1. Efektywne parametry modelu z zakresem ich zmienności

Parametr	Wartość minimalna	Wartość maksymalna	Wartość średnia
Parametry matrycy skalnej:			
• Efektywna porowatość w obszarze XRV $\phi_{m,XRV}$ [-]	0,005	0,02	0,01
• Ułamek porowatości efektywnej zajęty wodą zatłoczoną w obszarze SRV $S_{w,m}$ [-]	0,25	0,75	0,5
• Efektywna przepuszczalność dla gazu w obszarze XRV $k_{g,m,XRV}$ [nD]	1,00	25,00	5,00
• Iloraz efektywnej przepuszczalności dla gazu w obszarze SRV do efektywnej przepuszczalności dla gazu w obszarze XRV [-]	0,6	0,9	0,75
Parametry hydroszczelin:			
• Długość L_{hf} [m]	66,67	300	300
• Przewodność T_{hf} [m mD]	2,5	10	5
• Przepuszczalność k_{hf} [mD]	500	2000	1000
Parametry szczelin wtórnych:			
• Porowatość efektywna ϕ_f [-]	0,0002	0,005	0,005
• Przepuszczalność efektywna k_f [mD]	0,01	0,25	0,05
• Szerokość obszaru SRV wokół hydroszczeliny d_{SRV} [m]	2	20	10
Pozostałe parametry:			
• Miąższość formacji H [m]	27	99	45
• Ciśnienie początkowe P_{ini} [bar]	310	360	360
• Ciśnienie na spodzie odwiertu P_{bhp} [bar]	50	100	50

Modelowane wielkości eksploatacyjne (estymatory)

Analizę korelacyjną wykonano dla poniższych wielkości eksploatacyjnych zwanych dalej estymatorami:

1. F – *flowback* – objętość wydobytej wody w stosunku do objętości wody zatłoczonej.

Dla uproszczenia dalszej analizy rozpatrzono różnicę ΔF pomiędzy *flowbackiem* faktycznym F (wynikiem symulacji) a jego wielkością teoretyczną (asymptotyczną) F_t – uwzględniającą wpływ całej mobilnej wody znajdującej się w mikroszczelinach i w hydroszczelinach (idealny przypadek dla nieskończonego czasu), z wyłączeniem wody niemobilnej znajdującej się w matrycy. W symulacjach złożowych narzucono ograniczenie czasu prowadzenia eksploatacji, co skutkuje powstaniem dodatniej różnicy pomiędzy *flowbackiem* teoretycznym F_t a *flowbackiem* będącym wynikiem symulacji, gdzie *flowback* teoretyczny F_t to:

$$F_t = \frac{WIP_{mob,SRV}}{WIP_{SRV}} = \frac{W_f + W_{hf}}{W_m + W_f + W_{hf}} \left[\frac{Nm^3}{Nm^3} \right] \quad (1)$$

$$\Delta F = F_t - F \left[\frac{Nm^3}{Nm^3} \right] \quad (2)$$

gdzie:

W_f – objętość zatłoczonej wody w szczelinach strefy SRV [Nm^3],

$$W_f = \frac{V_{bulk,SRV} \cdot \phi_f \cdot S_w}{B_w} [Nm^3] \quad (3)$$

B_w – współczynnik objętościowy wody w początkowych warunkach złożowych,

S_w – nasycenie wodą efektywnej przestrzeni porowej (w przypadku matrycy przestrzeni porowej zredukowanej o wodę złożową),

$V_{bulk,SRV}$ – geometryczna objętość strefy SRV, pomniejszona o geometryczną objętość hydroszczelin,

$$V_{bulk,SRV} = n_f \cdot (d_{SRV} - d_{hf}) \cdot L_{SRV} \cdot H [m^3] \quad (4)$$

W_{hf} – objętości zatłoczonej wody w hydroszczelinach strefy SRV [Nm^3],

$$W_{hf} = \frac{V_{bulk,hf} \cdot \phi_{hf} \cdot S_w}{B_w} [Nm^3] \quad (5)$$

$$V_{bulk,hf} = n_f \cdot d_{hf} \cdot L_{SRV} \cdot H [m^3] \quad (6)$$

W_m – objętość zatłoczonej wody w matrycy strefy SRV [Nm^3],

$$W_m = \frac{V_{bulk,SRV} \cdot \phi_{m,SRV} \cdot S_{w,m}}{B_w} [Nm^3] \quad (7)$$

2. $q_{g,max,wz} = \frac{q_{g,max}}{GIP_{SRV}} \cdot \left[\frac{1}{doba} \right]$ – maksymalna wydajność wydobycia gazu w stosunku do ilości zasobów gazu znajdującej się w strefie SRV – ponieważ maksymalna wydajność wydobycia gazu zależy przede wszystkim od jego ilości w strefie SRV, wielkość tę odniesiono do ilości tych zasobów jako jednostkową wydajność wydobycia na 1 Nm^3 zasobów gazu w strefie SRV,

$$GIP_{SRV} = \frac{V_{bulk,SRV} \cdot \phi_{m,SRV} \cdot 1}{B_g} [Nm^3] \quad (8)$$

3. t_{max} [doba] – czas, po którym zaobserwowano maksymalną wydajność wydobycia gazu, $q_{g,max}$

4. $G_{p,max,wz} = \frac{G_p(t_{max})}{GIP_{SRV}}$, [-] – sumaryczne wydobycie gazu po czasie t_{max} w stosunku do jego zasobów początkowych w strefie SRV, GIP_{SRV} ,

5. $q_{g,sp} = \frac{q_g(2t_{max})}{q_{g,max}}$, [-] – spadek wydajności wydobycia gazu, zdefiniowany jako iloraz wydajności wydobycia gazu po czasie $2 t_{max}$ do $q_{g,max}$,

6. $q_{w,max,wz} = \frac{q_w(t_{max})}{WIP_{SRV}} \cdot \left[\frac{1}{doba} \right]$ – wydajność wydobycia wody w momencie osiągnięcia maksymalnej wydajności wypływu gazu z odwiertu w stosunku do objętości zatłoczonej wody, WIP_{SRV} ,
 WIP_{SRV} – sumaryczna ilość wody zatłoczonej znajdującej się w strefie SRV,

7. $q_{w,sp} = \frac{q_w(2t_{max})}{q_w(t_{max})}$, [-] – spadek wydajności wydobycia wody, zdefiniowany jako iloraz wydajności jej wydobycia po czasie $2 t_{max}$ do $q_w(t_{max})$.

Uwaga: Przyjęto normalizację wielkości wydobywczych w stosunku do zasobów w strefie SRV jako wielkości jednoznacznie zdefiniowanych.

Przyjęty schemat prowadzonych symulacji

Dla wyznaczenia wielkości wpływu poszczególnych parametrów (modyfikatorów) modeli symulacyjnych formacji łupkowych i ich udostępnienia na wyniki wielkości eksploatacyjnych (estymatorów) zastosowano metodę tzw. projektowanego eksperymentu (*Experimental Design*) [7]. W tym celu przeprowadzono wielokrotne symulacje, zakładając

określone kombinacje wartości modyfikatorów, według powyższej metody. Kombinacje te znaleziono, stosując następujący schemat typowy dla tej metody:

1. Założono dwupoziomowe, przeskalowane wartości poszczególnych modyfikatorów, $p_i = \pm 1$, odpowiadające minimalnym ($p_{i,min}^r$) i maksymalnym ($p_{i,max}^r$) wartościom ich

rzeczywistych zakresów ($p_{i,min}^r \leq p_i \leq p_{i,max}^r$) według wzoru:

$$p_i = \frac{2p_i^r - p_{i,min}^r - p_{i,max}^r}{p_{i,max}^r - p_{i,min}^r} \quad (9)$$

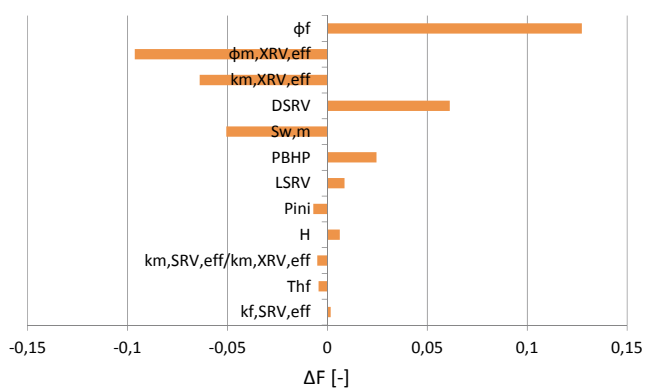
- Ze względu na stosunkowo dużą liczbę modyfikatorów zdefiniowanych powyżej ($m = 12$) zastosowanie wszystkich kombinacji (tzw. projekt kompletnych czynników – *full factorial*) $N = 2^m = 4096$ było praktycznie niemożliwe do realizacji;
- Zastosowano zatem schemat zredukowany – tzw. projekt niekompletnych czynników – *fractional factorial*. Projekt ten wygenerowano tak, aby zapewnić możliwość poprawnej oceny efektów liniowych (tzn. zależność analizowanych estymatorów od poszczególnych modyfikatorów) z zaniedbaniem efektów interakcji różnych modyfikatorów między sobą.

Analiza wpływu parametrów modelu (modyfikatorów) na wyniki symulowanych wielkości eksploatacyjnych (estymatorów)

W efekcie realizacji opisanej powyżej procedury uzyskano wyniki 1024 symulacji dla wszystkich rozpatrywanych estymatorów. Wielkość wpływu (tzw. wielkość efektu $w_i(e_j)$) poszczególnych parametrów modeli (modyfikatorów) p_i ($i = 1, \dots, 12$) na wartości estymatorów e_j ($j = 1, \dots, 7$) określono, stosując standardowy wzór użytej metody:

$$w_i(e_j) = \frac{1}{N} \sum_{p_k} S(e_j, p_1, \dots, p_i = +1, \dots, p_m) - \frac{1}{N} \sum_{p_k} S(e_j, p_1, \dots, p_i = -1, \dots, p_m) \quad (11)$$

gdzie: $S(e_j, p_1, \dots, p_m)$ to wynik symulacji dla estymatora e_j i modyfikatorów p_i ($i = 1, \dots, m$), $N = 1024$.



Rys. 2. Wpływ parametrów modelu (modyfikatorów) na wartość estymatora ΔF

W standardowej nomenklaturze metody *Experimental Design* wybrany schemat oznacza się jako:

$$2_{IV}^{12-2} (2_{CC}^{m-r}) \quad (10)$$

gdzie: $m = 12$ to podana wyżej liczba wszystkich czynników (modyfikatorów), $r = 2$ – stopień redukcji (2^2) w wyniku zastosowania schematu *fractional factorial*, a $CC = IV$ to tzw. rozdzielczość projektu, która dla podanej wartości oznacza rozdzielczość pozwalającą określić wpływ czynników liniowych dzięki ich niezależności od efektów wyższego rzędu (biliniowych).

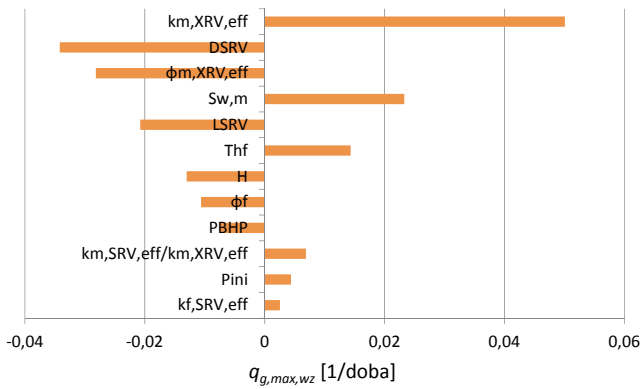
W rezultacie liczba niezależnych symulacji zostaje zredukowana czterokrotnie (do 1024) w stosunku do projektu typu *full factorial*. Konkretnie kombinacje modyfikatorów zostały wyznaczone zgodnie z ogólnymi zasadami metody.

Wielkości efektu $w_i(e_j)$ przedstawiono w postaci tzw. wykresów tornado na rysunkach 2–8. Pozwalają one określić, które z modyfikatorów mają decydujący wpływ na wielkość analizowanego estymatora. Modyfikatory o mniejszym wpływie na wyniki analizowano pod kątem generowanych przez nie błędów. Ostatecznie założono możliwość pominięcia modyfikatorów, dla których błąd względny wynosił do 10% średniej wartości estymatora (tablice 2–8).

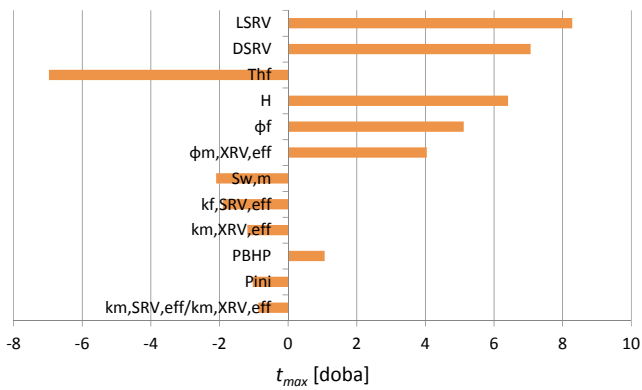
W wyniku takiej procedury określono parametry istotne dla kolejnych estymatorów, przedstawione w tablicy 9.

Tablica 2. Wpływ modyfikatorów o najmniejszym znaczeniu dla wartości estymatora ΔF

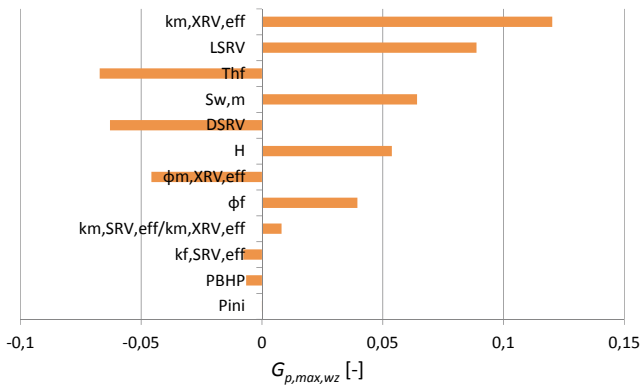
Modyfikator	Wartość średnia	Połowa średniej rozpiętości	Błąd względny [%]
$k_{f,SRV,eff}$	0,286	0,00387	1,35
T_{hf}	0,286	0,00658	2,30
$k_{m,SRV,eff}/k_{m,XRV,eff}$	0,286	0,00313	1,10
H	0,286	0,00958	3,35
P_{ini}	0,286	0,00657	2,30
L_{SRV}	0,286	0,01236	4,33



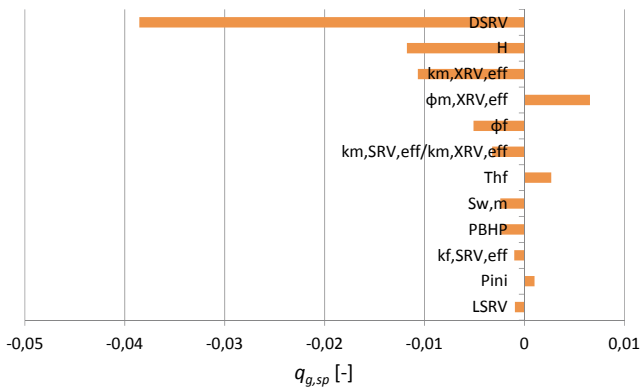
Rys. 3. Wpływ parametrów modelu (modyfikatorów) na wartość estymatora $q_{g,max,wz}$



Rys. 4. Wpływ parametrów modelu (modyfikatorów) na wartość estymatora t_{max}



Rys. 5. Wpływ parametrów modelu (modyfikatorów) na wartość estymatora $G_{p,max,wz}$



Rys. 6. Wpływ parametrów modelu (modyfikatorów) na wartość estymatora $q_{g,sp}$

Tablica 3. Wpływ modyfikatorów o najmniejszym znaczeniu dla wartości estymatora $q_{g,max,wz}$

Modyfikator	Wartość średnia	Połowa średniej rozpiętości	Błąd względny [%]
$k_{f,SRV,eff}$	0,0185	0,00120	6,48
P_{ini}	0,0185	0,00125	6,73
$k_{m,SRV,eff}/k_{m,XRV,eff}$	0,0185	0,00146	7,86

Tablica 4. Wpływ modyfikatorów o najmniejszym znaczeniu dla wartości estymatora t_{max}

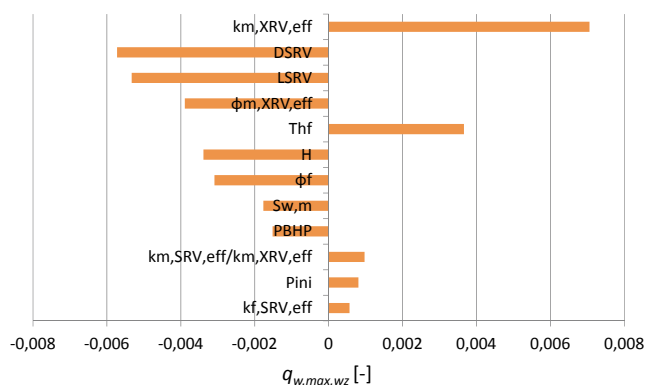
Modyfikator	Wartość średnia	Połowa średniej rozpiętości	Błąd względny [%]
$k_{m,SRV,eff}/k_{m,XRV,eff}$	9,81	0,388	3,95
P_{ini}	9,81	0,688	7,01
P_{BHP}	9,81	0,513	5,22

Tablica 5. Wpływ modyfikatorów o najmniejszym znaczeniu dla wartości estymatora $G_{p,max,wz}$

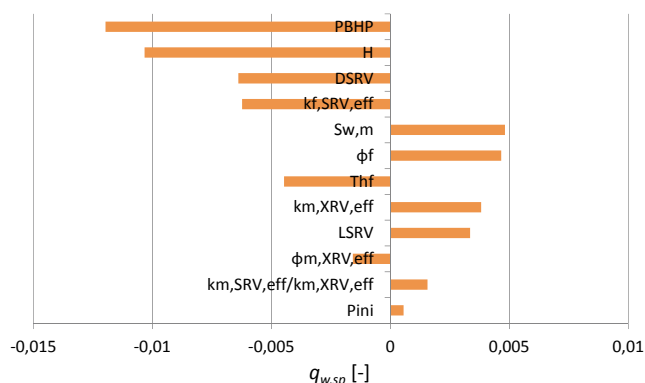
Modyfikator	Wartość średnia	Połowa średniej rozpiętości	Błąd względny [%]
P_{ini}	0,117	0,00203	1,73
P_{BHP}	0,117	0,00907	7,76
$k_{f,SRV,eff}$	0,117	0,00434	3,71
$k_{m,SRV,eff}/k_{m,XRV,eff}$	0,117	0,00513	4,39
ϕ_f	0,117	0,00821	7,02
ϕ_m,XRV,eff	0,117	0,00775	6,63

Tablica 6. Wpływ modyfikatorów o najmniejszym znaczeniu dla wartości estymatora $q_{g,sp}$

Modyfikator	Wartość średnia	Połowa średniej rozpiętości	Błąd względny [%]
L_{SRV}	0,853	0,02075	2,43
T_{jf}	0,853	0,01506	1,77
$S_{w,m}$	0,853	0,01523	1,79
P_{BHP}	0,853	0,00568	0,67
P_{ini}	0,853	0,00509	0,60
$k_{f,SRV,eff}$	0,853	0,00685	0,80
$k_{m,SRV,eff}/k_{m,XRV,eff}$	0,853	0,00750	0,88



Rys. 7. Wpływ parametrów modelu (modyfikatorów) na wartość estymatora $q_{w,max,wz}$



Rys. 8. Wpływ parametrów modelu (modyfikatorów) na wartość estymatora $q_{w,sp}$

Tablica 7. Wpływ modyfikatorów o najmniejszym znaczeniu dla wartości estymatora $q_{w,max,wz}$

Modyfikator	Wartość średnia	Połowa średniej rozpiętości	Błąd względny [%]
$k_{f,SRV,eff}$	0,00318	0,000266	8,35
P_{ini}	0,00318	0,000236	7,42
$k_{m,SRV,eff}/k_{m,XRV,eff}$	0,00318	0,000266	8,35

Tablica 8. Wpływ modyfikatorów o najmniejszym znaczeniu dla wartości estymatora $q_{w,sp}$

Modyfikator	Wartość średnia	Połowa średniej rozpiętości	Błąd względny [%]
L_{SRV}	0,617	0,00784	1,27
P_{ini}	0,617	0,00242	0,39
$\phi_{m,XRV,eff}$	0,617	0,00564	0,91
$k_{m,XRV,eff}$	0,617	0,01627	2,64
$k_{m,SRV,eff}/k_{m,XRV,eff}$	0,617	0,00385	0,62

Tablica 9. Identyfikacja istotnych/nieistotnych modyfikatorów dla analizy korelacyjnej rozpatrywanych estymatorów

Modyfikatory	Estymatory						
	ΔF	$q_{g,max,wz}$	t_{max}	$G_{p,max,wz}$	$q_{g,sp}$	$q_{w,max,wz}$	$q_{w,sp}$
L_{SRV}	0	x	x	x	0	x	0
D_{SRV}	x	x	x	x	x	x	x
T_{hf}	0	x	x	x	0	x	x
$S_{w,m}$	x	x	x	x	0	x	x
ϕ_f	x	x	x	0	x	x	x
H	0	x	x	x	x	x	x
P_{BHP}	x	x	0	0	0	x	x
P_{ini}	0	0	0	0	0	0	0
$\phi_{m,XRV,eff}$	x	x	x	0	x	x	0
$k_{m,XRV,eff}$	x	x	x	x	x	x	0
$k_{f,SRV,eff}$	0	0	x	0	0	0	x
$k_{m,SRV,eff}/k_{m,XRV,eff}$	0	0	0	0	0	0	0

Uwaga: x – parametr istotny, 0 – parametr nieistotny.

Wyznaczenie korelacji estymatory vs. modyfikatory

Na podstawie powyższych analiz, dla każdego z rozpatrywanych siedmiu estymatorów, e zależnych od m_e istotnych parametrów, p_i ($i = 1, 2, \dots, m_e$) przeprowadzono 2^{m_e} symulacji wariantów modeli odpowiadających wszystkim dwupoziomowym kombinacjom tych modyfikatorów ($p_i = \pm 1$). Dla

pozostałych $12 - m_e$ modyfikatorów o znalezionym mniejszym wpływie na wielkość estymatora przyjęto stałe wartości (średnie) podane w tablicy 1. Otrzymany zbiór wartości estymatora e wykorzystano do określenia układu 2^{m_e} równań pozwalającego jednoznacznie wyznaczyć współczynniki:

a_0, a_1, \dots, a_{m_e} w równaniu typu zależności wieloliniowych:

$$e(p_1, p_2, \dots, p_{m_e}) = a_0 + \sum_{1 \leq i \leq m_e} a_{1,i} p_i + \sum_{1 \leq i < j \leq m_e} a_{2,i,j} p_i p_j + \sum_{1 \leq i < j < k \leq m_e} a_{3,i,j,k} p_i p_j p_k + \dots + a_{m_e} p_1 p_2 \dots p_{m_e} \quad (12)$$

o dokładnie 2^{m_e} współczynników a .

Dzięki wybranej przeskalowanej postaci modyfikatorów p_i , przyjmujących wartości ± 1 , analizowany układ równań posiada jawne, niewymagające stosowania zaawansowanych procedur iteracyjnych rozwiązania na współczynniki a typu:

$$a_{l,i_1,i_2,\dots,i_l} = \frac{1}{M(m_e, l)} \sum_{p_{i_1}, p_{i_2}, \dots, p_{i_l}} e(p_{i_1}, p_{i_2}, \dots, p_{i_l}) p_{i_1} p_{i_2} \dots p_{i_l} \quad (13)$$

gdzie $M(m_e, l)$ jest liczbą członów w powyższej sumie:

$$M(m_e, l) = \binom{m_e}{l} \quad (14)$$

Przykładową postać rozwiązania dla współczynników a , zakładając postać estymatora o $m_e = 5$ istotnych modyfikatorach, przedstawiono w tabelicy 10.

Zastosowane przybliżenie odtwarza liniową składową zależność rozpatrywanych estymatorów od każdego z istotnych modyfikatorów, co w przypadku zależności od więcej niż jednego modyfikatora oznacza zależność wieloliniową. W rzeczywistości zależność ta ma również składowe nieliniowe (kwadratowe i wyższe). Uwzględnienie tych zależności wyższego rzędu oznacza konieczność rozpatrzenia znacznie bardziej skomplikowanych modeli, co na rozważanym wstępnym etapie określania analizowanych zależności wydaje się przedwczesne, lecz może stanowić w przyszłości temat rozszerzonego rozwiązania postawionego problemu. Poniżej określono wielkość efektów nieliniowych na przykładzie wybranych estymatorów i modyfikatorów. Na rysunku 9 przedstawiono wielkość estymatora ΔF w funkcji modyfikatora ϕ_f dla czterech jego różnych wartości i trzech różnych kombinacji pozostałych modyfikatorów (zestawy I, II, III). Krańcowe wartości modyfikatora oraz łącząca je linia prosta odpowiadają wielkościom otrzymanym z korelacji. Wartości estymatora dla modyfikatorów pośrednich odbiegają od zależności prostoliniowej i są miarą nieliniowości przedstawionej korelacji. W przypadku tego estymatora nieliniowość ta jest stosunkowo niewielka, co uzasadnia poprawność założenia użytego do znajdowania efektywnej korelacji. Można również znaleźć przy-

Tablica 10. Współczynniki zależności wieloliniowej dla przykładowego estymatora spadku wydajności wydobycia gazu $q_{g,sp}$, zależnego od 5 istotnych modyfikatorów

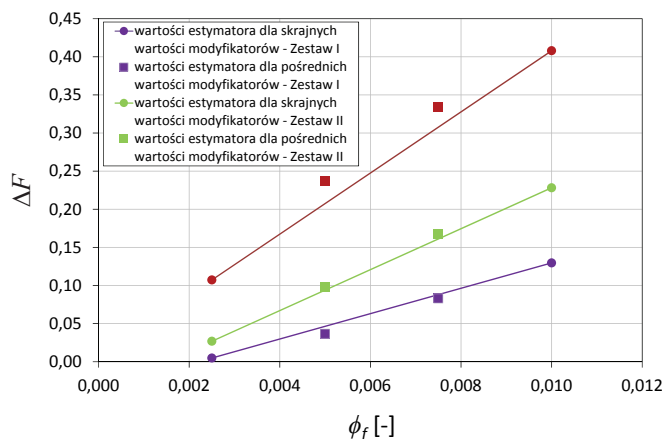
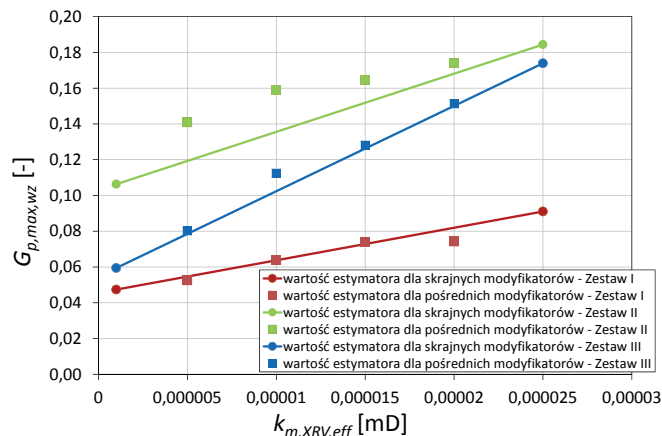
typ	Współczynnik					Wartość współczynnika	
	wskaźniki						
	i_1	i_2	i_3	i_4	i_5		
a_0	-	-	-	-	-	0,88234	
a_{1,i_1}	1	-	-	-	-	-0,04899	
	2	-	-	-	-	-0,00516	
	3	-	-	-	-	-0,01628	
	4	-	-	-	-	0,00329	
	5	-	-	-	-	-0,00235	
a_{2,i_1,i_2}	1	2	-	-	-	0,00029	
	1	3	-	-	-	-0,01319	
	1	4	-	-	-	-0,00085	
	1	5	-	-	-	-0,00383	
	2	3	-	-	-	0,00301	
	2	4	-	-	-	-0,00090	
	2	5	-	-	-	0,00958	
	3	4	-	-	-	-0,00161	
	3	5	-	-	-	-0,00156	
	4	5	-	-	-	-0,01257	
	a_{3,i_1,i_2,i_3}	1	2	3	-	-	0,00606
		1	2	4	-	-	-0,00404
1		2	5	-	-	0,00364	
1		3	4	-	-	-0,00624	
1		3	5	-	-	-0,00336	
1		4	5	-	-	-0,00589	
2		3	4	-	-	-0,00375	
2		3	5	-	-	0,00142	
2		4	5	-	-	0,00078	
3		4	5	-	-	-0,00054	
a_{4,i_1,i_2,i_3,i_4}	1	2	3	4	-	-0,00514	
	1	2	3	5	-	0,00392	
	1	2	4	5	-	-0,00162	
	1	3	4	5	-	-0,00673	
	2	3	4	5	-	-0,00075	
$a_{5,i_1,i_2,i_3,i_4,i_5}$	1	2	3	4	5	-0,00244	

padki estymatorów (rysunek 10), dla których efekty nieliniowe są większe, jednak użyte przybliżenie liniowe można traktować jako poprawne przybliżenie pierwszego rzędu wystarczające do zastosowań inżynierskich.

Podsumowanie

W pracy zaproponowano metodykę wyznaczenia korelacji wybranych wielkości eksploatacyjnych z parametrami zło-

żowymi dla odwiertów udostępniających formacje łupkowe, w oparciu o użycie złożowych modeli symulacyjnych w sche-

Rys. 9. Zależność estymatora ΔF od modyfikatora ϕ_f Rys. 10. Zależność estymatora $G_{p,max,wz}$ od modyfikatora $k_{m,XRV,eff}$

macie eksperymentów numerycznych. Przedstawiono zasadnicze etapy tej metodyki na przykładzie konkretnych zastosowań do modeli krajowych formacji łupkowych. Scharakteryzowano szczegóły wykorzystanych modeli symulacyjnych, zidentyfikowano istotne parametry tych modeli, opisano użyte założenia i uproszczenia prowadzące do efektywnej charakterystyki modelowanych formacji, zidentyfikowano praktyczne wielkości eksploatacyjne możliwe do wykorzystania w procesie rozwiązywania problemu odwrotnego.

Prosimy cytować jako: Nafta-Gaz 2016, nr 10, s. 805–813, DOI: 10.18668/NG.2016.10.05

Artykuł nadesłano do Redakcji 4.03.2016 r. Zatwierdzono do druku 13.07.2016 r.

Artykuł powstał na podstawie pracy badawczej, w ramach projektu Blue Gas pt. *Opracowanie optymalnych koncepcji zagospodarowania złóż niekonwencjonalnych z uwzględnieniem aspektów środowiskowych, zadanie 2: Optymalizacja rozwiercania złóż niekonwencjonalnych w procesie ich zagospodarowania poprzez dobór gęstości siatki odwiertów* – nr umowy: BG1/ResDev/13, nr zlecenia: 6115/KZ.

Literatura

- [1] Kasza P.: *Zabiegi hydraulicznego szczelinowania w formacjach łupkowych*. Nafta-Gaz 2011, nr 12, s. 874–883.
- [2] Michael J. Mayerhofer et al.: *What Is Stimulated Reservoir Volume?* Society of Petroleum Engineers 2010. SPE-119890-PA.
- [3] Newsham K. E., Rushing J. A.: *An Integrated Work-Flow Model to Characterize Unconventional Gas Resources: Part I – Geological Assessment and Petrophysical Evaluation*. Paper SPE 71351 presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, New Orleans, Louisiana, 30 September–3 October 2001. DOI: 10.2118/71351-MS.
- [4] Opracowanie zbiorowe. *Rzeczpospolita łupkowa. Studium wiedzy o gazie z formacji łupkowych*. Prace Naukowe INiG 2012, nr 183, 310 s.
- [5] Pakiet Eclipse 300, Release 2010.1, 2014.1 firmy GeoQuest, Schlumberger.
- [6] Rushing J. A., Newsham K. E.: *An Integrated Work-Flow Model to Characterize Unconventional Gas Resources: Part II – Formation Evaluation and Reservoir Modelling*. Paper SPE 71352 presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, New Orleans, Louisiana, 30 September–3 October 2001. DOI: 10.2118/71352-MS.
- [7] W. Szott: *Zastosowanie statystycznych metod projektowanego eksperymentu do probabilistycznej oceny zasobów złóż węglowodorów*. Prace INiG 2006, nr 138, s. 1–45.
- [8] Szott W., Gołabek A.: *Symulacje procesu eksploatacji złóż gazu ziemnego w formacjach łupkowych (shale gas)*. Nafta-Gaz 2012, nr 12, s. 923–936.
- [9] Szott W., Milek K.: *Methods to determine drainage area in shale formations produced by stimulated horizontal wells using reservoir simulation modelling*. Nafta-Gaz 2015, nr 12, s. 992–997.



Dr Wiesław Szott
Adiunkt; kierownik Zakładu Symulacji Złóż Węglowodorów i Podziemnych Magazynów Gazu.
Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy
ul. Lubicz 25 A
31-503 Kraków
E-mail: wieslaw.szott@inig.pl



Mgr inż. Krzysztof MILEK
Asystent w Zakładzie Symulacji Złóż Węglowodorów i Podziemnych Magazynów Gazu.
Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy
ul. Lubicz 25 A
31-503 Kraków
E-mail: krzysztof.milek@inig.pl