

Współczesny reżim tektoniczny w Polsce na podstawie analizy testów szczelinowania hydraulicznego ścian otworów wiertniczych — replika

Marek Jarosiński*



W polemice do mojego artykułu Michał Śmigielski i Marek Korpianiuk zebrali swoje uwagi w rozdziałach. Dla czytelności mojej odpowiedzi, opatrzę ją w identyczne tytuły rozdziałów.

Poprawność przeprowadzonych rachunków

Moi adwersarze słusznie wskazali pozycje w tabeli, gdzie podano nieściśle wartości obliczeń. Przyczynami ich zaistnienia są: zaokrąglenie parametrów obliczeniowych do wartości całkowitych już po wykona-

niu obliczeń oraz niestaranna korekta tekstu, za którą autor przeprasza wszystkich czytelników. Powyższa sytuacja skłania autora do zamieszczenia na końcu tego tekstu sprostowania. Jednocześnie pragnę zapewnić czytelników, że wprowadzone poprawki są znikome i nie mają istotnych konsekwencji dla wyników opracowania. W proporcjach między naprężeniami nie przekraczają one wartości 0,05 — dla otworów i 0,01 — dla jednostek strukturalnych. Różnice w wielkościach naprężeń S_V , S_H i S_h nie przekraczają 1 MPa.

Wiarygodność wartości określonych parametrów

Co do wiarygodności parametrów obliczeniowych, to poświęciłem temu w artykule dość dużo miejsca: ostatni akapit „Analizy wielkości naprężeń...”, cały rozdział „Specyfika testów wykonywanych w Polsce” oraz pierwszy

*Państwowy Instytut Geologiczny, ul. Rakowiecka 4, 00-975 Warszawa

akapit „Dyskusji wyników”. Również przy okazji omawiania każdego z testów, piszę o czytelności krytycznych ciśnień na krzywych testowych. Uwzględniając wiarygodność parametrów obliczeniowych przeprowadziłem kategoryzację jakości wyników obliczeń od dobrej do słabej (A, B, C). Rozumiem, że dla wnikliwego czytelnika, to może być niewystarczające, ale nie mogłem poświęcić temu więcej miejsca. Artykuł ma maksymalną, dopuszczalną w *Przeglądzie Geologicznym* objętość.

Nieco odmienną kwestią jest obliczanie błędu metody. Przedstawione przeze mnie szacunkowe wielkości maksymalnych błędów: 1 MPa dla S_h , 5 MPa dla S_H i do 1 MPa na każdy kilometr głębokości otworu dla S_V , moi polemisi uważają za niewystarczające. Domagają się oni podania konkretnych wartości liczbowych dla konkretnych testów. Z przykrością muszę stwierdzić, że jest to niemożliwe. O ile można by się pokusić o określenie dokładności odczytu ciśnień z krzywych (wyznaczonych z pewną rozdzielczością), o tyle źródła błędów, przy których błąd odczytu można zaniedbać, są niepoliczalne. Nie można np. skwantyfikować efektu zużycia odmiennych ilości płynu na uzyskane ciśnienia ISIP, wpływu lokalnie występującego efektu poro-sprężystego, efektów interakcji pomiędzy warstwami o odmiennych warunkach naprężeniowych w obrębie interwału szczelinowanego itd. Otóż, jak w wielu innych analizach geologicznych, tak i w tym przypadku, wiemy, że wiele zjawisk jest źródłem błędu, ale nie znamy algorytmów, lub nie mamy dostatecznych danych do ich obliczenia. Jednak, dzięki znajomości (z literatury) wielu przykładów lepiej skonfigurowanych testów i badań laboratoryjnych, możemy oszacować typowy zakres błędu. Takie podejście zostało zaprezentowane w artykule.

Moi polemisi słusznie domyślają się wpływu nieortogonalnego położenia osi naprężeń głównych względem powierzchni ziemi oraz odchylenia otworu od pionu, na wynik obliczeń. Otóż, nie dysponujemy żadnymi danymi, które pozwoliłyby na określenie rozmiarów odchylenia osi elipsoidy naprężeń od powierzchni ziemi, w sąsiedztwie badanych otworów. W artykule piszę, że poza Karpatami nie spodziewam się istotnych odchyżeń od układu ortogonalnego. Wynika to z ogólnej prawidłowości, że w kompleksach o płożych powierzchniach warstwowań, w kontekście śródpływowym, przy nieznacznym tempie deformacji, osie naprężeń głównych ustawione są zazwyczaj ortogonalnie względem powierzchni ziemi. Dla otworów zlokalizowanych w Karpatach, nie mamy żadnych danych, na podstawie których można by oszacować ten efekt. Analiza pełnego spektrum możliwych przypadków byłaby bezcelowa i zbyt skomplikowana, by prezentować ją na marginesie omawianego artykułu. Na podstawie obliczeń autorskim programem SIGMAC można stwierdzić, że odchylenie osi naprężeń głównych od pionu w granicach do 15° nie pociąga za sobą istotnych konsekwencji dla wyników obliczeń z testów szczelinowania. Przy odchyleniu o ponad 20° , wpływ ten może być istotny, w zależności od kształtu elipsoidy naprężeń i jej orientacji względem powierzchni ziemi.

Ta sama relacja dotyczy nachylenia osi otworu (odchylenia od pionu), w przypadku gdy S_V jest jednym z naprężeń głównych. W prawie wszystkich badanych otworach (poza otworem Mełgiew-7k), nachylenie szczelinowanych interwałów nie przekracza 9° . Modelowanie programem SIGMAC pokazuje, że nachylenie otworu do 10° powoduje różnice w obliczeniach S_H mniejsze niż 1 MPa. Jest to

znacznie poniżej szacowanego, maksymalnego błędu wyznaczenia S_H i może być w obliczeniach zaniedbane. Z kolei otwór Mełgiew-7k, w odcinku szczelinowania nachylony jest do 31° w kierunku odbiegającym od S_H o 35° . Taka orientacja otworu powoduje istotny wzrost naprężenia stycznego w punkcie zniszczenia o 7,5 MPa, co prowadzi z kolei do analogicznego podwyższenia ciśnienia P_b . Ponieważ odchylenie otworu nie wpływa na wielkość S_V oraz S_h (szczelina zatrząskuje się z dala od strefy lokalnych zaburzeń pola naprężeń wokół otworu), to skutkiem uwzględnienia tej poprawki jest podwyższenie wartości S_H o 6%, względem wielkości wyliczonej z testu. Należy podkreślić, że przy występującym tu reżimie naprężeń, poprawka ta zmierza zawsze w kierunku podwyższenia S_H , co przyczynia się do wzmocnienia oszacowanego dla tego otworu reżimu przesuwczego.

Kształt krzywej ciśnienia dla otworu Mełgiew-7k nie wskazuje jednak na pierwotne zniszczenie ściany, ale na rozwarcie już istniejącej szczeliny (lub wielu szczelin) — piszę o tym przy omawianiu testu z tego otworu. Proces otwierania istniejących szczelin, w otworach nachylonych jest przedmiotem analiz odmienną metody obliczeniowej (*FPM — Fracture Pressurization Method*). Wyniki obliczeń tą metodą wykorzystują szczegółowe dane o orientacji szczelin nachylonych względem osi otworu. Ponieważ nie mamy danych o orientacji szczelin, zdecydowałem się, również w tym przypadku, zastosować uproszczoną metodę szacowania wielkości naprężeń, której wyniki nie odbiegają drastycznie od wyników *FPM*. Między innymi z tego powodu, wynikiem z otworu Mełgiew-7k przypisałem najniższą wiarygodność (C — w przyjętej przeze mnie skali).

Zasadność wyciągniętych wniosków

Moi polemisi twierdzą, że zmiana S_h powoduje zmianę anizotropii naprężeń i podają na to przykłady obliczeń. Wynika to w sposób oczywisty z przedstawionych w artykule wzorów, i nie wymaga komentarza. Poważniejszym stwierdzeniem jest możliwość występowania w analizowanych otworach odmiennego reżimu naprężeń, niż wynika z zamieszczonych w artykule obliczeń. Taka możliwość istnieje dla wskazanych przez polemistów otworów, w przypadku obniżenia S_H o wartość bliską szacowanemu błędowi maksymalnego (5 MPa). Jednakże większość czynników generujących błędy, a zwłaszcza odchylenie osi otworu od osi naprężenia głównego, powoduje niedoszacowanie wielkości S_H z testów (por. rozdział poprzedni), a nie jego przeszacowanie, jakie sprzyjałoby zmianie reżimu naprężeń. Można zatem stwierdzić, że występowanie tu innych reżimów niż oszacowane z testów jest możliwe, ale mało prawdopodobne, zwłaszcza w przypadku testów, którym nadałem kategorie jakości A i B. Dla otworów Osobnica-138 i Tuligłowy-40, bez względu na jakość pomiaru, reżim nie został oszacowany jednoznacznie, określono go jako przejściowy: TF/SS i NF/SS. Odpowiedni komentarz został zamieszczony w „Dyskusji wyników”.

W dalszym ciągu, moi adwersarze wyobrażają sobie, że „(...) jeśli wymienione czynniki powodują jednak błąd S_h większy niż np. 3 MPa to (...) precyzyjne określenie reżimu tektonicznego jest czystą spekulacją”. W tym miejscu warto jeszcze raz podkreślić, że wartość S_h jest najbardziej stabilną wielkością, czytana wprost z wykresów i niezależną od szeregu założeń, które obciążają wyniki

obliczeń S_H . Dlatego rozciąganie zakresu możliwego błędu S_h wydaje się nieuzasadnione.

Moi polemisi ponadto wątpią we względną jednorodność uzyskanych wyników. Ponieważ jest ona względna, to pozostawiam to ocenie czytelników. Moim zdaniem najlepiej ją ilustruje pionowy profil naprężeń (ryc. 9 — patrz Jarosiński, 2005, vol. 53, str. 871). W tym miejscu można postawić pytanie, dlaczego otrzymane wyniki są tak jednorodne, skoro dane są tak złe. W artykule zwróciłem już uwagę na możliwość uśrednienia naprężeń w dłuższym szczelinowanym interwale otworu, zawierającym wiele ławic, o zmiennych własnościach mechanicznych i warunkach naprężeniowych. Warto tu dodać, że podobnemu uśrednieniu mogą podlegać różnorodne, współwystępujące ze sobą zjawiska technologiczne, takie jak: jednoczesne wystąpienia zniszczeń pierwotnych i otwartych szczelin; jednoczesne rozwieranie szczelin zorientowanych optymalnie w kierunku naprężeń ekstensyjnych oraz nieco od nich odbiegających; występowanie efektu poro-sprężystego tylko w niektórych fragmentach szczelinowanego interwału. Wzajemna interferencja tych czynników, w pierwszej fazie otwierania głównej szczeliny, może prowadzić do wyeliminowania efektów ekstremalnych, jakie mogą mieć miejsce, gdy szczelinowaniu poddawane są pojedyncze ławice.

W polemice pojawia się stwierdzenie, że odchylenie standardowe rzędu 0,14 (tzn. 10% wartości średniej) świadczy o niejednorodności wyników, gdyż odbiega od wzorca 0,03 (ok. 2% wartości średniej). W światowej bazie naprężeń (http://www-wsm.physik.uni-karlsruhe.de/pub/stress_data/stress_data_frame.html) odchylenie standardowe do $\pm 12^\circ$ (13% maksymalnego błędu, wyznaczonego przez 90°) mają pomiary kierunków naprężeń o najwyższej klasie jakości (jakość A w pięciostopniowej skali). Niejednorodność kierunków i wielkości naprężeń w obrębie pokrywy osadowej jest normą, toteż oczekiwanie odchylenia standardowego dla pomiarów wykonanych w oddalonych od siebie otworach na poziomie 2% wartości średniej jest zupełnie nierealistyczne.

Podsumowanie

Zgadzam się, z moimi polemistami, że wyniki przeprowadzonych przeze mnie badań nie uprawniają „do rozciągania wniosków na teren całego kraju”. Nigdzie nie obiecywałem, że ustalę reżimy naprężeń w całej Polsce. Wyniki moich badań dotyczą miejsc, gdzie zlokalizowane są otwory, a ściślej rzecz biorąc skały w promieniu kilkudziesięciu metrów od każdego z otworów. W sumie, oszacowałem reżimy naprężeń dla najwyżej kilku tysięcy m² w poziomie i kilkudziesięciu metrów w pionie. Danych,

ponad wszelką wątpliwość, jest mało, niemniej wykorzystane są wszystkie aktualne dane z obszaru Polski. Również moim zdaniem, wyników tych analiz nie można uznać za definitywne, co jest zresztą cechą znacznej części badań geologicznych, w tym tektonicznych.

Co do obliczania odchylenia standardowego dla zbiorów mających 3 lub 4 dane, to jest ono konieczne, gdy służy porównywaniu zbiorów. Ponieważ takich porównań w artykule nie dokonuję, nie liczę odchylenia standardowego. Dla tych kilku danych każdy może łatwo ocenić odchylenie indywidualnej wartości od podanej średniej.

Spodziewana wielkość błędów została wskazana i czytelnik może eksplorować przypadki skrajne na własną rękę (jak to zrobili moi polemisi). W artykule przedstawiłem główną linię interpretacyjną, gdyż rozbudowane dygresje utrudniłyby jego odbiór. To fakt, że podanie przedziałów błędów, lub chociażby przedstawienie ich na wykresie, robiłoby wrażenie bardziej precyzyjnej analizy; byłoby jednak mylące, gdyż przedziały ufności nie były w istocie możliwe do obliczenia.

Wnioski

Na zakończenie wypada mi wyrazić zadowolenie, że tekst mojego artykułu doczekał się tak wnikliwej analizy. Autorzy polemiki wykazali, że na podstawie tego tekstu można kontynuować samodzielne rozważania i wyciągać dalej idące wnioski. Poczytuję to sobie za zasługę. Podzielałam szereg uwag polemistów dotyczących jakości testów, zwłaszcza, że w większości są powtórzeniem zastrzeżeń, jakie zawarłem w artykule. Moi polemisi, nie parając się jednak tą metodą badań, stawiają przed nią zbyt wygórowane wymagania. Konfiguracja tych testów nie pozwala na ilościowe podjęcie analizy błędu. Nie znaczy to jednak, że skoro błąd nie jest policzalny, to należy zaniechać badań. Szacunkowe, lub standardowe wielkości parametrów przyjmowane są powszechnie przy modelowaniu zjawisk geodynamicznych. W badaniach geologicznych często przychodzi nam pogodzić się z niedoskonałością lub małą ilością danych. Niekiedy oznaczenie wieku terranów opiera się na pojedynczych, słabo zachowanych skamieniałościach. W przypadku dyskutowanego artykułu, dane otworowe można porównać do kilkunastu średnio i słabo zachowanych skamieniałości (stosownie do ich jakości). Biorąc pod uwagę, że są to pierwsze analizy reżimu współczesnych naprężeń w otworach wiertniczych w Polsce, mam nadzieję, że z czasem ich przybędzie.

Na zakończenie pragnę podziękować za tę polemikę, która umożliwiła mi rozwinięcie niektórych, z konieczności skrótowo w artykule potraktowanych kwestii oraz usunięcie błędów korektorskich.

Sprostowanie

Poniżej **boldem** zaznaczono poprawki, w nawiasie umieszczono obecne, błędne fragmenty tekstu. Str. 867, druga szpalta, wiersz 16: **18,5** (19); **21,5** (21). Str. 867, Tabela 1: Stuposiany-4, Pro: **15** (19); Jodłówka-21, SH/SV: **1,10** (1,05); Wola Zalew.-1, Sh: **47** (46), SH/Sh: **1,48** (1,51); Stężyca-2, SH/SV: **1,14** (1,11), SH/Sh: **1,34** (1,29); Stężyca-3K, Sh: **53** (52), SH-Sh: **25** (23). Str. 869, 4 linijka od góry: **62** (61). Str. 870, 16 linijka od dołu: **reżim** (reżimu). W sprostowaniu nie uwzględniono poprawek w proporcjach naprężeń dla jednostek strukturalnych, gdyż wprowadzanie korekt mniejszych niż 1% uważam, w tym przypadku, za bezcelowe.