

ỨNG DỤNG PHƯƠNG PHÁP TỐI ƯU BỀ MẶT ĐÁP ỨNG VÀ THIẾT KẾ THỬ NGHIỆM BOX-BEHNKEN NHẪM TỐI ƯU HÓA THIẾT KẾ NÚT VĨA THỦY LỰC CHO ĐỐI TƯỢNG MIOCENE DƯỚI, MỎ BẠCH HỔ

Nguyễn Hữu Trường, Hà Như Ý

Đại học Dầu khí Việt Nam

Email: truongnh@pvu.edu.vn

<https://doi.org/10.47800/PVJ.2021.05-03>

Tóm tắt

Bài báo giới thiệu kết quả ứng dụng phương pháp tối ưu bề mặt đáp ứng (RSM) và thiết kế thử nghiệm Box-Behnken để đánh giá ảnh hưởng của các thông số tối hiệu quả khai thác sau nứt vỉa cho đối tượng Miocene dưới, mỏ Bạch Hổ. Các thông số (chiều dài khe nứt, nồng độ hạt chèn, lưu lượng bơm, độ nhớt dung dịch nứt vỉa) ảnh hưởng tới hiệu quả kinh tế và được tối ưu ứng với yêu cầu giá trị hiện tại ròng (NPV) tối đa trong thời gian tính toán sản lượng dầu khai thác trong 3 năm. Kết quả phân tích độ nhạy cho phép đánh giá mức độ ảnh hưởng cũng như tác động của các thông số trên tới giá trị hiện tại ròng.

Từ khóa: Tối ưu bề mặt đáp ứng, thiết kế Box-Behnken, nứt vỉa thủy lực, Miocene dưới, mỏ Bạch Hổ.

1. Giới thiệu

Công nghệ nứt vỉa thủy lực được sử dụng rộng rãi để kích thích vỉa nhằm nâng cao sản lượng khai thác dầu hoặc khí. Tuy nhiên, quá trình thiết kế nứt vỉa thủy lực thường gặp khó khăn khi phải đưa ra quyết định về các thông số xử lý nứt vỉa thủy lực: chiều dài khe nứt, độ nhớt dung dịch nứt vỉa, lưu lượng bơm, thời gian bơm, loại hạt chèn, nồng độ hạt chèn, hệ số thất thoát dung dịch nứt vỉa... Đặc biệt, tối đa NPV là tiêu chí quan trọng để xác định thiết kế nứt vỉa thủy lực đó là tối ưu [1 - 3]. NPV thu được trên cơ sở phân tích độ nhạy của các xử lý nứt vỉa thủy lực và chiều dài khe nứt. Tính toán NPV được thực hiện thông qua việc phân tích độ nhạy của các thông số xử lý nứt vỉa thủy lực khác nhau và chiều dài khe nứt.

Đối với mỗi thử nghiệm thiết kế không đảm bảo thực hiện thiết kế nứt vỉa thủy lực tối ưu bởi vì nó loại bỏ kích bản các thông số tiềm năng có ảnh hưởng tới hoạt động vận hành khác nhau như: khả năng bơm, độ bền ống khai thác (tubing strength), áp suất làm việc tối đa của các thiết bị trên bề mặt và yêu cầu sự phát triển hình dạng khe nứt. Có nhiều thuận lợi với thiết kế mục tiêu yêu cầu khác nhau

trên cơ sở tối đa giá trị hiện tại ròng (NPV) và tối thiểu giá thành xử lý nứt vỉa thủy lực. Thực hiện tối ưu nứt vỉa thủy lực trong việc cân nhắc lưu lượng bơm, thời gian bơm, nồng độ hạt chèn như là các thông số xử lý nứt vỉa thủy lực độc lập [4]. Tuy nhiên, nghiên cứu này đã bỏ qua sự tương tác của các thông số xử lý nứt vỉa thủy lực, hệ số thất thoát dung dịch nứt vỉa tới NPV, hay hiệu quả khai thác sau nứt vỉa. Ba thông số xử lý nứt vỉa thủy lực được tối ưu với khoảng cụ thể với yêu cầu tối đa hóa NPV trên cơ sở chiều cao khe nứt không đổi và chiều dài các khe nứt khác nhau. Có phương pháp đã tối ưu được chiều dài, chiều rộng khe nứt với mỗi khối lượng hạt chèn cho trước cho đối tượng vỉa cụ thể, tuy nhiên nghiên cứu chưa tối ưu thông số xử lý nứt vỉa thủy lực và sự tương tác của chúng theo lợi nhuận ròng [5]. Phương pháp [6] rà soát các thiết kế nứt vỉa thủy lực trên cơ sở hình dạng khe nứt và kết hợp xử lý nứt vỉa thủy lực thực tế để từ đó tối ưu nứt vỉa thủy lực.

Trong các trường hợp thiết kế tối ưu, việc tối ưu hóa các thông số thiết kế xử lý nứt vỉa thủy lực chưa đủ mức độ tin cậy vì bỏ qua mức độ ảnh hưởng của các thông số xử lý nứt vỉa và ảnh hưởng sự tương tác giữa các thông số tới giá trị hiện tại thuần, điều này dẫn đến hiệu quả nứt vỉa thủy lực không như kỳ vọng.

Áp dụng thiết kế thử nghiệm Box-Behnken và tối ưu



Ngày nhận bài: 15/3/2021. Ngày phản biện đánh giá và sửa chữa: 15/3 - 1/4/2021.

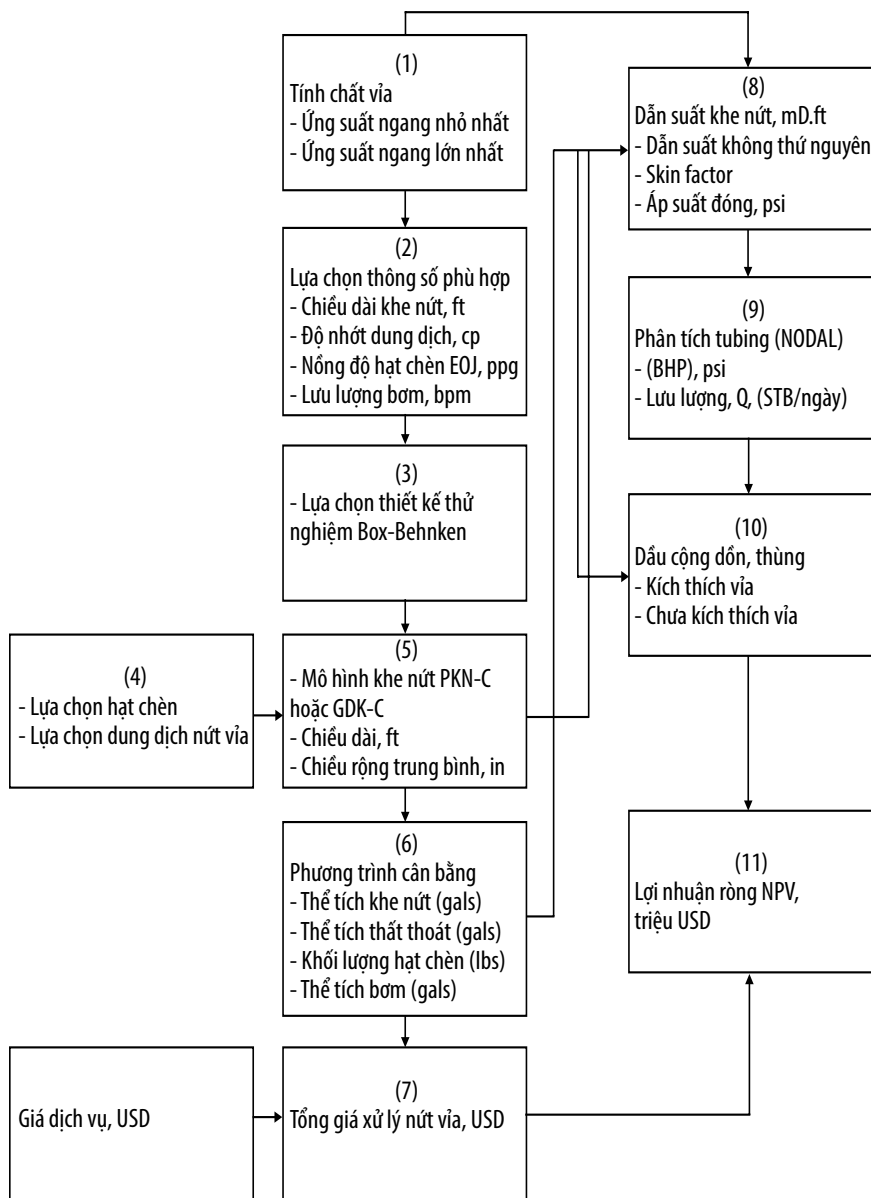
Ngày bài báo được duyệt đăng: 25/5/2021.

bề mặt đáp ứng (RSM) sẽ loại bỏ được hạn chế này để tối ưu các thông số, đồng thời cho phép phân tích ảnh hưởng của từng thông số, sự tương tác của các thông số, đánh giá mức độ ảnh hưởng cũng như độ tin cậy trong tối ưu hóa trước khi tiến hành thiết kế nứt vỉa thủy lực chính thức.

2. Mô hình tối ưu hóa các thông số thiết kế nứt vỉa

Hình 1 cho thấy sơ đồ mô hình tối ưu thông số xử lý nứt vỉa thủy lực cho đối tượng Miocene dưới. Các bước thực hiện theo thứ tự như sau:

- Xác định tính chất vỉa và các ứng suất tại chỗ;
- Sàng lọc các thông số xử lý nứt vỉa thủy lực chính có thể điều chỉnh trên bề mặt;
- Lựa chọn thiết kế thí nghiệm phù hợp;
- Lựa chọn mô hình khe nứt phù hợp;



Hình 1. Mô hình phát triển để xử lý tối ưu nứt vỉa thủy lực cho đối tượng Miocene dưới.

- Tính toán thể tích dung dịch, khối lượng hạt chèn, công suất bơm, giá thành xử lý nứt vỉa thủy lực, và tính toán chiều rộng hạt chèn trong khe nứt, chiều dài hạt chèn trong khe nứt bằng cách sử dụng phương trình cân bằng;

- Tính toán dẫn suất hạt chèn trong khe nứt ở điều kiện có hệ số hư hại dẫn suất hạt chèn, độ rỗng hạt chèn, độ thấm gói hạt chèn và sự phân bố hạt chèn, áp suất đóng khe nứt;

- Tính toán dẫn suất không thứ nguyên, hệ số Skin và thực hiện mô phỏng khai thác trong 3 năm trong điều kiện chế độ khai thác chuyển tiếp cho trường hợp cơ sở và trường hợp mô phỏng. Cuối cùng, tính toán lợi nhuận ròng cho 3 năm khai thác trên cơ sở giá dầu, tỷ số lợi tức, thực hiện tối ưu thông số xử lý nứt vỉa thủy lực khi NPV tối đa và chi phí tối thiểu.

3. Trường ứng suất

Hướng và các giá trị của ứng suất tại chỗ sẽ xác định hướng và hình dạng của các khe nứt lan truyền [7, 8]. Trạng thái của ứng suất được thực hiện bởi 3 ứng suất chính vuông góc với nhau trong đó σ_1 biểu thị ứng suất chính lớn nhất, σ_2 ứng suất chính trung gian và σ_3 ứng suất chính nhỏ nhất [9]. Các khe nứt lan truyền từ kết quả nứt vỉa thủy lực vuông góc với ứng suất chính nhỏ nhất [10]. Ở bể Cửu Long, cả ứng suất ngang nhỏ nhất và ứng suất ngang lớn nhất được xác định theo phương pháp thực nghiệm [11].

Ứng suất ngang lớn nhất được xác định theo công thức dưới đây:

$$S_H = 0,0155Z + \alpha \frac{1-2\nu}{1-\nu} (P_p - P_n) \quad (1)$$

Phương pháp kiểm tra leak-off test (LOT), mini-frac test và phương pháp leak-off test mở rộng (extend-

ed) được sử dụng để xác định ứng suất tối thiểu [12, 13]. Đối với phương pháp thực nghiệm, ứng suất ngang nhỏ nhất có thể được tính theo phương trình sau [11]:

$$S_h = 0,0135Z + \alpha \frac{1-2\nu}{1-\nu} (P_p - P_h) \quad (2)$$

Trong thực tế thi công khoan ngoài hiện trường, chênh áp giữa áp suất lỗ rỗng và áp suất thủy tĩnh thường được thiết kế rất nhỏ nên giá trị ứng suất ngang nhỏ nhất được xác định là 0,0135Z, còn giá trị ứng suất ngang lớn nhất là 0,0155Z.

Trong đó:

P_p : Áp suất lỗ rỗng (MPa);

P_h : Áp suất thủy tĩnh (MPa);

α : Yếu tố đàn hồi của Biot;

ν : Tỷ số Poisson;

Z: Độ sâu thẳng đứng của giếng (m).

4. Mô hình khe nứt

Mô hình khe nứt PKN-C dùng để kích thích nứt vỉa thủy lực cho đối tượng Miocene dưới vì có tính tới hệ số thất thoát dung dịch; chiều dài khe nứt lớn hơn nhiều so với chiều cao khe nứt. Có nhiều mô hình để tính toán sự phát triển khe nứt như chiều dài, chiều cao và chiều rộng khe nứt. Đó là hàm của các thông số khác nhau dựa trên mô hình khe nứt thực tế, chẳng hạn như: mô hình 2D [14, 15], mô hình giả 3 chiều (p-3D) [16] và mô hình 3 chiều (3D) [17]. Để ước tính hình dạng khe nứt chính xác trong quá trình nứt vỉa thủy lực cho đối tượng Miocene dưới, mô hình khe nứt 2D PKN-C, được sử dụng dựa trên nghiên cứu ban đầu của Perkins, Kern và Nordgren và phương trình Carter II kết hợp phương trình cân bằng vật chất [18]. Trong trường hợp không có hệ số thất thoát dung dịch, mô hình khe nứt 2D, mô hình p-3D và mô hình đầy đủ 3D không diễn tả đầy đủ sự phát triển khe nứt vì chúng không tính tới hệ số thất thoát dung dịch. Do đó, mô hình PKN-C phù hợp để xác định chiều dài và chiều rộng khe nứt dựa trên tổng thể tích dung dịch được bơm vào. Mô hình PKN-C liên quan đến chiều rộng đứt gãy ở lòng giếng, chiều dài khe nứt, lưu lượng bơm, chỉ số ứng xử và chỉ số độ sệt dung dịch nứt vỉa của chất lỏng phi Newton và tính chất của đất đá có thể được xác định bằng [19]:

$$w_f = 9,15 \frac{1}{2n+2} 3,98 \frac{n}{2n+2} \left(\frac{1+2,14n}{n} \right)^{\frac{n}{2n+2}} K^{\frac{1}{2n+2}} \left(\left(\frac{q_i}{2} \right)^n \frac{h_f^{1-m} x_f}{E'} \right)^{\frac{1}{2n+2}} \quad (3)$$

Chiều rộng trung bình khe nứt với hệ số mô hình $\pi/5$ được tính: $w_a = (\pi/5) \times w_f$

Giải phương trình cân bằng (Carter II) có tính tới hệ số thất thoát dung dịch trên cơ sở lưu lượng bơm không đổi, chiều dài khe nứt được biểu diễn như sau [18]:

$$x_f = \frac{(w_a + 2S_p) q_i}{4C_l^2 \pi h_f} \left[\exp(\beta^2) \operatorname{erfc}(\beta) + \frac{2\beta}{\sqrt{\pi}} - 1 \right], \text{ với } \beta = \frac{2C_l \sqrt{\pi t_i}}{w_a + 2S_p} \quad (4)$$

Áp suất khe nứt được tính như sau:

$$P_{net} = \frac{E'}{2h_f} \times w_f \quad (5)$$

Áp suất xử lý nứt vỉa thủy lực ở đáy giếng là:

$$P_{treat} = \sigma_1 + P_{net} \quad (6)$$

Trong đó σ_1 là ứng suất ngang nhỏ nhất (psi).

Mối liên hệ giữa tổng thể tích bơm V_i (gồm thể tích dung dịch nứt vỉa, thể tích hạt chèn), thể tích dung dịch đệm V_{pad} và hiệu quả nứt vỉa η được xác định bởi công thức sau [1, 20]:

$$V_{pad} = V_i \left(\frac{1-\eta}{1+\eta} \right) \quad (7)$$

Trong đó hiệu quả nứt vỉa thường được xác định thông qua mini-frac test, từ đó cho phép thiết kế quy trình bơm tối ưu.

4.1. Công nghệ bơm nứt vỉa thủy lực

Nứt vỉa thủy lực được sử dụng để gia tăng sản lượng khai thác dầu, khí cho đối tượng vỉa có độ thấm thấp, mức độ liên thông kém, vỉa bị nhiễm bẩn. Nứt vỉa thủy lực thường được chia thành 3 giai đoạn.

- Giai đoạn 1 là đệm thể tích không chứa hạt chèn để nứt vỉa (tạo chiều dài, chiều rộng khe nứt ban đầu); chiều rộng khe nứt phải đảm bảo lớn hơn 3 lần đường kính hạt chèn trung bình [21]. Để tối ưu hóa thể tích dung dịch đệm cần phải xác định hiệu quả nứt vỉa dựa trên nứt vỉa thử nghiệm mini-frac test. Trong phân tích áp suất đáy giếng suy giảm của mini-frac test lúc đóng giếng, áp suất đáy giếng sẽ giảm theo hệ số mất dung dịch và độ thấm của thành hệ. Như vậy, phân tích suy giảm áp suất đáy giếng bằng mini-frac test nhằm xác định hình dạng khe nứt, hệ số thất thoát dung dịch, lưu lượng bơm để thực hiện bơm nứt vỉa chính.

- Giai đoạn 2 là tiến hành bơm dung dịch nứt vỉa trộn hạt chèn để giữ cho khe nứt luôn luôn mở sau khi kết thúc nứt vỉa và từ đó tạo đường dẫn có độ thấm cao khiến chất lưu dễ dàng di chuyển từ khe nứt tới giếng khai thác.

- Giai đoạn 3 là bơm chất phá gel làm sạch khe nứt nhằm tăng dẫn suất khe nứt và tạo điều kiện đưa dung dịch nứt vỉa ra khỏi giếng.

Sự tăng chỉ số khai thác sản phẩm phụ thuộc vào độ dẫn suất của khe nứt và hình dạng khe nứt có hạt chèn ở lúc kết thúc bơm. Vì vậy, vấn đề quan trọng là phải thiết kế nứt vỉa để cho sự phân bố hạt chèn bên trong khe nứt là lớn nhất khi kết thúc bơm. Phương pháp xác định thể tích dung dịch đệm tối ưu và lịch trình bơm có hạt chèn dựa trên hiệu quả nứt vỉa. Thể tích dung dịch đệm không chứa hạt chèn được tính như sau [20]:

$$V_p = q_{inj} \times t_{pad} \times t_{inj} \quad (8)$$

Trong đó:

q_{inj} : Lưu lượng bơm (thùng/phút);

t_{inj} : Thời gian bơm (phút);

t_{pad} : Thời gian bơm dung dịch đệm (phút).

Khi đó sẽ có:

$$f = \frac{t_{pad}}{t_{inj}} = \left\{ \frac{1 + \sqrt{1^2 + 4lk(k-1)}}{2k} \right\}^2 \quad (9)$$

$$l = 1 - e_f$$

$$k = 1 + 0,1781l$$

Trong đó, e_f là hiệu quả nứt vỉa (%).

Nồng độ hạt chèn là một hàm số của thời gian bơm được xác định bởi công thức:

$$C_p(t) = C_f \left[\frac{t - t_{pad}}{t_{inj} - t_{pad}} \right]^{\frac{1-f}{e_f}} \quad (10)$$

Với $C_p(t)$ là nồng độ hạt chèn tại thời gian t (ppg), C_f là nồng độ hạt chèn mong muốn ở lúc kết thúc bơm (ppg). Các bước thiết kế lịch trình bơm như sau:

Xác định C_f , q_{inj} , e_f và t_{inj} ;

Xác định l khi biết hiệu quả nứt vỉa;

Xác định k , khi biết l ;

Xác định f , khi biết k và l ;

Xác định thời gian bơm dung dịch đệm khi biết tổng thời gian bơm và l ;

Xác định thể tích dung dịch đệm, V_{pad} khi biết q_{inj} và t_{pad} ;

Xác định lịch trình bơm có hạt chèn $C_p(t)$ ở thời gian mong muốn.

4.2. Phương trình cân bằng

Khe nứt phát triển trong quá trình bơm và tuân theo phương trình cân bằng vật chất phổ biến được định nghĩa là $V_i = V_f + V_r$ trong đó:

V_i : Tổng thể tích bơm vào giếng;

V_f : Thể tích khe nứt;

V_r : Thể tích dung dịch thất thoát.

Thể tích khe nứt, V_r được xác nhận là 2 bên cánh của khe nứt tính từ giếng. Phương trình cân bằng vật chất dùng để tính toán khối lượng hạt chèn, thể tích dung dịch không có hạt chèn, thể tích dung dịch thất thoát, để từ đó tính toán giá thành xử lý nứt vỉa thủy lực.

5. Mô hình dẫn suất

Giá trị dẫn suất khe nứt là thông số đo lường khả năng chất lưu di chuyển trong khe nứt. Độ dẫn suất của gói hạt chèn thường được đo trong phòng thí nghiệm theo tiêu chuẩn API và phụ thuộc vào loại hạt chèn, kích thước hạt chèn, hình dạng hạt chèn, độ thấm, độ xốp của gói hạt chèn dưới áp suất đóng. Tiêu chuẩn API đo độ dẫn suất gói hạt chèn trên cơ sở nồng độ hạt chèn 2lb/ft² [22]. Khi biết giá trị độ thấm gói hạt chèn dưới áp suất đóng, giá trị độ dẫn suất gói hạt chèn được tính như sau:

$$\text{Dẫn suất (md.ft)} = k_p w_p \quad (11)$$

Trong đó:

k_p : Độ thấm của gói hạt chèn (mD);

w_p : Chiều rộng do hạt chèn tạo ra trong khe nứt (ft).

5.1. Chiều rộng hạt chèn

Giả sử toàn bộ khối lượng hạt chèn trên bề mặt (M_p) được bơm vào khe nứt để chiếm chỗ và tạo ra chiều dài khe nứt (x_f) và chiều cao khe nứt (h_f). Trong điều kiện hạt chèn phân bố đồng đều bên trong khe nứt, ta có:

$$M_p = 2x_f h_f w_p (1 - \phi_p) \rho_p \quad (12)$$

Từ công thức (12), chiều rộng hạt chèn (w_p) lúc kết thúc bơm được tính như sau:

$$w_p = \frac{M_p}{2x_f h_f (1 - \phi_p) \rho_p} \quad (13)$$

Trong đó, $2x_f h_f w_p (1 - \phi_p)$ biểu diễn thể tích của gói hạt chèn bên trong thể tích khe nứt và thể hiện đặc điểm, kích thước và tỷ trọng riêng của hạt chèn. Tỷ trọng riêng gói hạt chèn (ρ_p) cho biết các đặc điểm của hạt chèn được chọn, như đường kính, hình dạng, độ rỗng gói hạt chèn phụ thuộc điều kiện đất đá vỉa, áp suất đóng khe nứt.

5.2. Độ thấm gói hạt chèn

Giá trị độ thấm gói hạt chèn phụ thuộc vào áp suất đóng khe nứt, đường kính trung bình của hạt chèn, độ

rỗng gói hạt chèn và chất lượng đồng đều của hạt chèn. Mô hình độ thấm gói hạt chèn được biểu diễn như sau [21]:

$$k_p = \frac{d_p^2 \phi_p^3}{150(1-\phi_p)^2} \quad (14)$$

Trong đó:

k_p : Độ thấm của gói hạt chèn (mD);

d_p : Đường kính trung bình của hạt chèn;

ϕ_p : Độ rỗng của gói hạt chèn (%).

6. Chế độ khai thác chuyển tiếp

Dựa trên hiện trạng của áp suất đáy giếng không đổi, chế độ khai thác dầu chuyển tiếp của giếng đã nút vỉa được biểu diễn như sau [23]:

$$(p_i - p_{wf}) = \frac{162,6q_o B_o \mu}{kh} \left(\log t + \log \frac{k}{\phi \mu c_t r_w'^2} - 3,23 + s \right) \quad (15)$$

Trong đó:

P_i : Áp suất vỉa ban đầu (psi);

t: Thời gian khai thác ở chế độ chuyển tiếp (tháng);

k: Độ thấm vỉa (mD);

c_t : Tổng độ nén (psi^{-1});

s: Hệ số skin đạt được sau nút vỉa;

h: Chiều dày vỉa (ft);

μ : Độ nhớt của vỉa dầu (cp);

B_o : Hệ số thể tích vỉa dầu (res bbl/STB).

r_w' : Bán kính hiệu dụng đạt được sau nút vỉa được cho bởi công thức: $r_w' = r_w e^{-s_f}$, s_f là hệ số skin được tính từ công thức mối liên hệ [24] $s_f = F - \ln\left(\frac{x_f}{r_w}\right)$. Hệ số F được tính như sau:

$$F = \frac{1,65 - 0,328u + 0,116u^2}{1 + 0,18u + 0,064u^2 + 0,005u^3} \quad (16)$$

Trong đó:

$u = \ln(F_{CD})$ và $F_{CD} = (k_{wf}/k_{xf})$; k_{wf} là dẫn suất của khe nứt trong các điều kiện cụ thể về áp suất đóng của khe nứt, sự phân bố của hạt chèn bên trong khe nứt, loại và kích thước hạt chèn, độ rỗng và độ thấm của gói hạt

chèn dưới tác dụng của áp suất đóng, cường độ nén của hạt chèn.

F_{CD} là dẫn suất không thứ nguyên của khe nứt trong điều kiện số hạt chèn, cùng với tỷ số phát triển/lan truyền của khe nứt với bán kính ảnh hưởng ($2x_f/x_e$) dựa trên thể tích khe nứt được thiết lập bên trong khe nứt.

Số hạt chèn được tính theo mô hình [25]:

$$N_{prop} = \frac{2k_f V_{prop}}{k V_{res}} \quad (17)$$

Trong đó:

k_f : Độ thấm hiệu dụng của gói hạt chèn (mD);

k: Độ thấm của vỉa (mD);

V_{prop} : Thể tích khe nứt phát triển trong đất đá (ft^3);

V_{res} : Thể tích tháo khô của vỉa chứa (ft^3).

7. Mô hình kinh tế

NPV là lợi nhuận ròng thu được từ gia tăng sản lượng khai thác dầu khí do nút vỉa thủy lực được biểu diễn bởi công thức sau [1]:

$$NPV = \sum_{j=1}^N \frac{(V_f)_j}{(1+i)^j} - \sum_{j=1}^N \frac{(V_o)_j}{(1+i)^j} - C_{tr} \quad (18)$$

Chi phí giá thành nút vỉa có dạng như sau:

$$C_{tr} = P_{fl} \times V_{tfl} + P_{pr} \times W_{pr} + P_{pump} \times HP_{av} + P_{pump\pi} \times t_{hi} + P_{pump\pi r} \times t_{hr} + FC \quad (19)$$

Trong đó:

NPV: Giá trị hiện tại ròng (USD);

V_f : Giá trị lợi nhuận thu được từ việc nút vỉa (USD);

V_o : Giá trị lợi nhuận thu được từ vỉa chưa được nút vỉa (USD);

i: Tỷ suất chiết khấu (%);

C_{tr} : Tổng giá trị chi phí trong quá trình nút vỉa (USD);

N: Số năm khai thác dầu khí (năm);

P_{fl} : Giá thành của dung dịch nút vỉa (USD/gallon);

V_{tfl} : Thể tích của dung dịch nút vỉa chưa có hạt chèn (gallons);

Bảng 1. Tính chất của một số loại hạt chèn [21]

Kích thước hạt theo (USA)	8 - 12	10 - 20	10 - 30	20 - 40	40 - 60
Độ mở sàng (mm)	2,38 - 1,68	2,00 - 0,84	2,00 - 0,589	0,84 - 0,42	0,42 - 0,250
Độ thấm gần đúng (μm) ²	1722	321	188	119	44
Độ rỗng (%)	0,36	0,32	0,32	0,35	0,32

- P_{pr} : Giá thành của hạt chèn (USD/lb);
- W_{pr} : Khối lượng hạt chèn sử dụng (lbs);
- P_{pump} : Giá thành thuê máy bơm (USD/HHP);
- HP_{av} : Công suất trung bình của máy bơm (HHP);
- P_{pumpi} : Giá thành thuê bơm lúc bơm không hoạt động (USD/giờ);
- t_{hi} : Thời gian bơm không hoạt động (giờ);
- P_{pumpr} : Giá thành bơm vận hành nút vĩa thủy lực (USD/giờ);
- t_{hr} : Thời gian bơm nút vĩa thủy lực (giờ);
- FC: Chi phí cố định ban đầu (USD).

8. Thiết kế Box-Behnken và phương pháp tối ưu bề mặt đáp ứng

Phương pháp tối ưu bề mặt đáp ứng (RSM) là phương pháp thống kê dựa trên mô hình phi tuyến tính đa biến và đã được sử dụng rộng rãi để tối ưu hóa các biến độc lập của quá trình xử lý. RSM thường bao gồm thiết kế các thử nghiệm cung cấp các phép đo nhằm đáp ứng mức độ tin cậy của quá trình để từ đó phát triển một mô hình toán học phù hợp nhất với dữ liệu thu được, để xác định giá trị tối ưu (tối đa hoặc tối thiểu) của các biến độc lập [26 - 28]. Để dự đoán yêu cầu, phương trình đa thức bậc 2 (là hàm của các biến độc lập và sự tương tác giữa các biến độc lập ấy) đã được phát triển từ phương pháp bề mặt đáp ứng [29]. Thiết kế bậc 2, có thể xoay hoặc gần như xoay được, dựa trên thiết kế 3 cấp không hoàn chỉnh [30]:

- + Hình lập phương bao gồm điểm chính giữa và điểm giữa của các cạnh;
- + Hình gồm 3 thiết kế giai thừa lồng vào nhau và một điểm chính giữa. Số lượng thí nghiệm N cần thiết cho sự phát triển của thiết kế thí nghiệm Box-Behnken được xác định là $N = 2k(k - 1) + C_0$ (trong đó k là các thông số thiết kế nút vĩa và C_0 là số điểm trung tâm).

Mô hình hồi quy đầy đủ có dạng:

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i X_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} X_i^2 + \sum_{i < j} \beta_{ij} X_i X_j + \epsilon \quad (20)$$

Trong đó:

- Y: Hàm mục tiêu, mô hình nghiên cứu mô tả quy luật tìm được;
- X_i : Nhân tố hoặc sự kiện hay yếu tố ảnh hưởng lên hàm mục tiêu;
- β_j : Hệ số hồi quy bậc 1, mô tả ảnh hưởng của các nhân tố X_i lên hàm mục tiêu;

β_{ij} : Hệ số hồi quy bậc 1, mô tả ảnh hưởng đồng thời của 2 nhân tố X_i, X_j ;

β_j : Hệ số hồi quy bậc 2, mô tả ảnh hưởng bậc 2 của nhân tố X_j lên kết quả thực nghiệm.

β_0 : Hệ số tự do trong mô hình.

Hệ số hồi quy của phương trình hồi quy cho biết:

- Giá trị tuyệt đối β_j mô tả mức độ ảnh hưởng của nó: giá trị lớn nhất có ảnh hưởng mạnh, giá trị nhỏ nhất thì ảnh hưởng yếu hoặc không ảnh hưởng.

- Dấu của hệ số β_j :

$\beta_j > 0$: Ảnh hưởng tích cực lên hàm mục tiêu vì làm hàm mục tiêu tăng lên;

$\beta_j < 0$: Ảnh hưởng tiêu cực lên hàm mục tiêu vì làm hàm mục tiêu giảm.

Ý nghĩa của hàm mục tiêu: Phương trình hàm mục tiêu hoặc phương trình hồi quy nhằm mô tả ảnh hưởng của các thông số lên một quá trình nào đó bằng một phương trình. Tìm được hàm mục tiêu mô tả đúng sẽ xác định được giá trị hàm mục tiêu quá trình mà không cần làm thực nghiệm.

Nguyên tắc tìm các hệ số hồi quy: có bao nhiêu ẩn (hệ số hồi quy β) thì ít nhất phải có bấy nhiêu phương trình (nếu không thì phương trình sẽ vô định hoặc vô nghiệm).

- Quy trình thực hiện tối ưu hóa

Phương pháp tối ưu hóa bề mặt đáp ứng dựa trên quy hoạch ma trận nhiều yếu tố là phương pháp hiệu quả nhất nhằm tìm ra điều kiện tối ưu 4 thông số thiết kế nút vĩa ứng với lợi nhuận ròng tối đa. Các thông số thiết kế nút vĩa là các biến độc lập bao gồm độ nhớt dung dịch, lưu lượng bơm, nồng độ hạt chèn, chiều dài khe nút; các biến này là các biến thực nghiệm và hàm mục tiêu sẽ là lợi nhuận ròng NPV (triệu USD). Đầu tiên để tính các hệ số thực nghiệm của mô hình hồi quy toán học, trong kế hoạch thực nghiệm người ta sử dụng các mức yếu tố theo giá trị mã hóa. Đây là đại lượng không thứ nguyên quy đổi chuẩn hóa từ các giá trị thực của yếu tố nhờ quan hệ:

Xác định tâm của phương án theo công thức sau:

$$Z_0 = \frac{Z_{max} + Z_{min}}{2} \quad (21)$$

Trong đó:

- Z_{max} : Mức trên của thông số thiết kế nút vĩa thủy lực;
- Z_{min} : Mức dưới của thông số thiết kế nút vĩa thủy lực;
- Z_0 : Mức cơ sở.

Giá trị mã hóa:

$$X_j = \frac{Z_j - Z_0}{\Delta Z_j} = \frac{2(Z_j - Z_0)}{Z_{jmax} - Z_{jmin}} \quad (22)$$

- Giải bài toán tối ưu theo các bước sau:
 - + Khảo sát điều kiện biên cho 4 thông số thiết kế bao gồm: chiều dài khe nứt, độ nhớt dung dịch nứt vỉa, nồng độ hạt chèn, và lưu lượng bơm;
 - + Xác định phương trình hồi quy theo quy hoạch ma trận các yếu tố toàn phần bằng phần mềm thống kê Modde 5.0;
 - + Xác định mức độ phù hợp của mô hình hồi quy được thể hiện qua giá trị của R²;
 - + Xác định điều kiện tối ưu cho các thông số vận hành nứt vỉa thủy lực;
 - + Sử dụng phần mềm Modde 5.0 để xác định giá trị lợi nhuận ròng tối đa tương ứng với các thông số thiết kế tối ưu như chiều dài khe nứt, độ nhớt dung dịch nứt vỉa, nồng độ hạt chèn, lưu lượng bơm;
 - + Điều kiện tiến hành sử dụng thiết kế thử nghiệm: Khảo sát sự phù hợp của 4 thông số thiết kế nứt vỉa: Độ nhớt dung dịch nứt vỉa X₁ (cp), lưu lượng bơm X₂ (thùng/phút), nồng độ hạt chèn EOJ X₃ (ppg), chiều dài khe nứt X₄ (ft), tới hàm mục tiêu Y là lợi nhuận ròng NPV (triệu USD).

Các biến thử nghiệm bao gồm độ nhớt của dung dịch nứt vỉa (cp), lưu lượng bơm q (thùng/phút), nồng độ hạt chèn kết thúc bơm P_c (ppg) và chiều dài đứt gãy x_f (ft). Ba thông số xử lý thiết kế đầu tiên được kiểm soát ở bề mặt. Chiều dài khe nứt x_f được coi là biến số thứ 4 để cho phép sự phát triển hình dáng của khe nứt. Do đó, các biến thiết kế bị ràng buộc trong giới hạn trên và giới hạn dưới như sau:

- 90 ft ≤ x_f ≤ 1.500 ft: Giới hạn trên được chọn để sự lan truyền khe nứt nằm trong điều kiện ranh giới của vỉa.
- 16 thùng/phút ≤ q_i ≤ 30 thùng/phút: Do yêu cầu về áp suất bề mặt nằm dưới áp suất làm việc của thiết bị bề mặt, thành hệ không bị phá hủy do áp suất khe nứt quá

lớn, sự phát triển áp suất xử lý đáy giếng nằm trong giới hạn áp suất nổ của ống khai thác.

- 8 ppg ≤ P_c ≤ 10 ppg: [1, 31].
- 70 cp ≤ μ ≤ 800 cp: Theo yêu cầu vận hành ngoài hiện trường và theo khuyến nghị [23, 32] để vận chuyển hạt chèn hiệu quả và tốc độ sa lắng tối thiểu của hạt chèn.

Áp dụng thiết kế thử nghiệm Box-Behnken để đánh giá ảnh hưởng của độ nhớt của dung dịch nứt vỉa (cp), lưu lượng bơm q (thùng/phút), nồng độ hạt chèn kết thúc bơm P_c (ppg) và chiều dài đứt gãy x_f (ft) đến lợi nhuận ròng. Số các thử nghiệm với tâm là 1 cho 4 thông số trên được tính như sau: 2 × 4 (4 - 1) + 1 = 25. Bốn thông số, giới hạn của chúng đối với thiết kế thử nghiệm Box-Behnken và mối quan hệ của các thông số độc lập được trình bày trong Bảng 2.

Mức của thông số được mã hóa và thực tế cho mỗi thí nghiệm trên ma trận thiết kế được thể hiện trong Bảng 3. Dựa trên bảng này, các thử nghiệm cung cấp các yêu cầu NPV tại các thông số thiết kế tương ứng trong ma trận thiết kế thử nghiệm Box-Behnken. Những dữ liệu thử nghiệm này được sử dụng để xác nhận mô hình phản hồi đơn của quy trình hoạt động. Mỗi lần thử nghiệm đều có các thông số cho quá trình nứt vỉa thủy lực (dựa trên mô hình khe nứt phù hợp), cho giếng sau nứt vỉa và sản lượng dầu cộng dồn ở chế độ khai thác chuyển tiếp trong thời gian 3 năm. Các thông số đầu vào cho mô hình kinh tế gồm: giá dầu trung bình là 60 USD/thùng, trong đó giá dầu phụ thuộc vào thời điểm và địa điểm, giá hạt chèn 0,4 USD/lbm, giá dung dịch nứt vỉa 1 USD/gallon, giá thành bơm 3,25 USD/giờ/mã lực, chi phí cố định là 15.000 USD và tỷ lệ chiết khấu là 10%/năm. Và các yếu tố đánh giá khai thác, chi phí vận hành và tỷ suất lợi nhuận trên vốn để xác định lợi nhuận ròng (NPV).

Giá trị lợi nhuận ròng NPV và sản lượng khai thác dầu cộng dồn trong 3 năm của chế độ khai thác chuyển tiếp được trình bày dưới dạng các biến độc lập của hàm mục tiêu tương ứng và được tìm thấy trong ma trận thiết kế thử nghiệm. Trình tự của mỗi dữ liệu thử nghiệm được sử dụng để xác nhận một giá trị của hàm mục tiêu đơn của quy trình.

Bảng 2. Ma trận bố trí thí nghiệm mã hóa các biến

Nhân tố	Nhân tố gốc	Thông số mã hóa		
		Thấp	Tâm	Cao
		-1	0	1
Độ nhớt (cp)	X ₁	70	435	800
Lưu lượng bơm (thùng/phút)	X ₂	16	23	30
Nồng độ hạt chèn EOJ (ppg)	X ₃	8	9	10
Chiều dài khe nứt x _f (ft)	X ₄	90	795	1500

Bảng 3. Thiết kế Box-Behnken cho 4 thông số

TT	Các biến mã hóa				Các biến thực				Hàm mục tiêu	
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	Độ nhớt (cp)	Lưu lượng bơm (thùng/phút)	Nồng độ hạt cùn P _c (ppg)	Chiều dài khe nứt x _f (ft)	Dầu cọng dồn (1.000 thùng)	NPV (Triệu USD)
1	-1	-1	0	0	70	16	9	795	1984,1	66,49
2	1	-1	0	0	800	16	9	795	2159,7	75,17
3	-1	1	0	0	70	30	9	795	2028,5	68,78
4	1	1	0	0	800	30	9	795	2209,5	77,69
5	0	0	-1	-1	435	23	8	90	1475,0	41,14
6	0	0	1	-1	435	23	10	90	1514,1	43,11
7	0	0	-1	1	435	23	8	1500	2351,2	84,15
8	0	0	1	1	435	23	10	1500	2419,8	87,40
9	-1	0	0	-1	70	23	9	90	1423,2	38,00
10	1	0	0	-1	800	23	9	90	1521,6	43,49
11	-1	0	0	1	70	23	9	1500	2248,8	79,23
12	1	0	0	1	800	23	9	1500	2433,1	88,01
13	0	-1	-1	0	435	16	8	795	2078,4	71,16
14	0	1	-1	0	435	30	8	795	2126,3	73,61
15	0	-1	1	0	435	16	10	795	2146,3	74,51
16	0	1	1	0	435	30	10	795	2195,5	77,02
17	-1	0	-1	0	70	23	8	795	1975,7	66,12
18	1	0	-1	0	800	23	8	795	2151,6	74,82
19	-1	0	1	0	70	23	10	795	2040,2	69,33
20	1	0	1	0	800	23	10	795	2221,2	78,24
21	0	-1	0	-1	435	16	9	90	1479,5	41,37
22	0	1	0	-1	435	30	9	90	1507,3	42,77
23	0	-1	0	1	435	16	9	1500	2359,7	84,35
24	0	1	0	1	435	30	9	1500	2408,1	86,95
25	0	0	0	0	435	23	9	795	2141,9	74,35

Bảng 4. Kết quả thực tế số nứt vỉa thủy lực đối tượng Miocene dưới

STT	Tên giếng	Đối tượng nứt vỉa	Ngày nứt vỉa	Khối lượng hạt cùn (tấn)	Áp suất bơm (atm)	Trước nứt vỉa			Sau nứt vỉa			Sản lượng tăng (tấn)
						Lưu lượng lỏng (m ³)	Lưu lượng dầu (m ³)	%, Nước	Lưu lượng lỏng (m ³)	Lưu lượng dầu (m ³)	%, Nước	
1	7010	Miocene dưới	2/7/2018	80	358	27	21	0	295	202	11.2	181
2	7011	Miocene dưới	15/7/2018	91	458	10	6	24	40	23	24	17
3	904	Miocene dưới	20/8/2018	81	311	72	56	6	165	129	6	73
4	611H	Miocene dưới	23/8/2018	71	159	8	6	0	20	17	1	11
5	609	Miocene dưới	28/6/2019	80	236	34	28	4	61	49	4	21
6	607	Miocene dưới	5/7/2019	80	197	42	36	0	103	82	6	46
7	903	Miocene dưới	2/8/2019	108	246	36	29	6	86	45	39	16

9. Áp dụng cho đối tượng Miocene, mỏ Bạch Hổ

Tầng Miocene dưới của mỏ Bạch Hổ có chiều dày khoảng 770 - 900 m, nằm giữa các tầng địa chấn SH-7 và SH-3. Thành phần thạch học được chia làm 2 phần chính: Phần trên, chủ yếu là sét và sét kết màu xám, xám lá, xen kẹp các lớp bột kết và cát kết với số lượng tăng dần từ trên xuống dưới (đến 50%), trên cùng là tập sét montmorillonite Rotalia có chiều dày tập sét này dao động từ 35 m (chủ yếu

ở phía Nam mỏ) lên đến 150 m (ở một số giếng khoan phần Đông - Nam). Phần dưới, trầm tích chủ yếu là cát kết và bột kết (hơn 60%) xen kẽ với các lớp sét mỏng màu xám, vàng - đỏ hoặc ngũ sắc. Trong lát cắt của đập nằm dưới tầng SH-5 bao gồm 5 tập sản phẩm, trong đó có 3 tầng sản phẩm phát triển ở thể các thấu kính riêng biệt [33, 34]. Độ rỗng hở của vỉa nằm trong khoảng 15 - 23%, trong khi độ thấm hiệu dụng trong khoảng rất rộng, từ 2,5 mD cho tới hàng nghìn

Bảng 5. Thông số vỉa và thông số giếng

Thông số	Giá trị
Diện tích tháo khô (acres)	194
Bán kính tháo khô (ft)	1640
Chiều sâu vỉa (ft)	9612
Chiều cao vỉa (ft)	212,4
Độ rỗng (%)	13,5
Độ thấm vỉa (mD)	2,7
Áp suất vỉa ban đầu (psi)	3960
Nhiệt độ vỉa ban đầu (°F)	221
Độ bão hòa dầu (%)	63
Hệ số độ nén vỉa (psi ⁻¹)	1,45 × 10 ⁻⁶
Áp suất đóng (psi)	5735
Module đàn hồi cát kết (psi)	3 × 10 ⁶
Tỷ số Poisson's	0,25
Bán kính giếng (ft)	0,25
Hệ số thể tích của dầu (RB/STB)	1,4
Tỷ trọng dầu API	35
Độ nhớt dầu vỉa (cp)	1,074
Đường kính trong tubing (inch)	2,992
Đường kính ngoài tubing (inch)	3,5

Bảng 6. Thông tin hạt chèn lựa chọn

Thông số	Giá trị
Loại hạt chèn	16/30 Sintered Ball Bauxite
Tỷ trọng (sg)	3,56
Cường độ nén	HSP
Đường kính trung bình (inch)	0,038
Độ rỗng gói hạt chèn	0,38
Hệ số hư hại dẫn suất	0,5

Bảng 7. Thông số kinh tế

Thông số	Giá trị
Giá hạt chèn (USD/lbm)	0,4
Giá dung dịch nứt vỉa (USD/gallon)	1
Tỷ suất chiết khấu (%)	10
Giá bơm (USD/giờ/HHP)	3,25
Chi phí cố định (USD)	15000
Giá thành thuê giàn tự nâng (USD/ngày)	75000
Giá thuê tàu dịch vụ (USD/ngày)	20000
Giá thành bốc xếp (USD/tấn hạt chèn)	2,2
Giá dầu thô (USD/thùng)	60
Số năm thu lợi nhuận ròng NPV	3

Bảng 8. Bảng ANOVA

NPV (Triệu USD)	Bậc tự do	Tổng bình phương (SS)	Bình phương trung bình (MS)	Giá trị thống kê (F)	P	SD
Tổng	25	123075	4923.01			
Phần dư	1	116589	116589			
Tổng chính xác	24	6485,85	270,224			16,4391
Thông số tham gia hồi quy	14	6483,04	463,074	1646,29	0,000	21,5192
Phần dư	10	2,81284	0,281284			0,530362
N = 25		Q ² = 0,998		RSD = 0,5304		
DF = 10		R ² = 0,999		R ² _{Adj} = 0,999		

mD. Hạt chèn Sintered Ball Bauxite 16/30 được lựa chọn vì có cường độ chịu nén cao từ 10.000 psi tới 20.000 psi [5]; có độ thấm cao, vì vậy dẫn suất khe nứt sau nứt vỉa cao so với loại hạt chèn có đường kính hạt nhỏ hơn. Trầm tích của điệp lắng đọng trong môi trường đồng bằng bồi đắp ven bờ, vũng vịnh sông hồ và biển gần bờ. Vỉa được bao phủ bởi lớp đất đá trên và lớp đất đá bên dưới có độ cứng cao, ứng suất cao, độ thấm thấp, độ rỗng thấp. Việc phát triển mô hình dùng để tối ưu các thông số trước khi tiến hành thiết kế một nứt vỉa thủy lực là cần thiết (Hình 1). Các thông tin thể hiện trên Bảng 5 - 7.

10. Kết quả và thảo luận

Dựa trên kết quả phân tích phương sai, mức độ phù hợp và tính đầy đủ của các mô hình đã được liệt kê trong Bảng 8, mức độ tin cậy của mô hình được thể hiện thông qua hệ số hồi quy R² = 0,999 trình bày trong bảng ANOVA đối với mô hình hồi quy bậc hai. Ngoài ra, giá trị bằng 0,999 của độ tin cậy điều chỉnh (R² điều chỉnh, cũng được trình bày trên bảng) chứng tỏ mô hình có ý nghĩa cao với mức tin cậy 95%. Tương tự, giá trị độ lệch chuẩn dư thấp tại 0,53. Từ đó có thể thấy dự báo có mức độ chính xác và tin cậy cao của các giá trị thực nghiệm.

Tối ưu hóa bằng phương pháp bề mặt đáp ứng có nhiều lợi ích hơn so với tối ưu hóa thông số đơn truyền thống bởi vì phương pháp này cho phép tiết kiệm thời gian, không gian, nguyên vật liệu trong quá trình nứt vỉa thủy lực. Có tổng cộng 25 trường hợp thử nghiệm của thiết kế thử nghiệm Box-Behnken cho 4 thông số với tâm 1 để xây dựng ma trận cột dùng để tối ưu hóa các thông số nghiên cứu. Bảng 3 cho thấy thiết kế của các điều kiện thí nghiệm và kết quả tính toán NPV trong thời gian 3 năm khai thác theo thiết kế Box-Behnken.

Trên Bảng 3, NPV cao nhất được ghi nhận trong trường hợp 12 với các thông số xử lý bao gồm độ nứt dung dịch nứt vỉa là 800 cp, lưu lượng bơm 23 thùng/phút, nồng độ hạt chèn là 9 ppg và chiều dài khe nứt là 1.500 ft. Bằng cách sử dụng phương pháp bề mặt đáp ứng trên cơ sở dữ liệu tính toán thực tế, mối tương quan

giữa hàm yêu cầu NPV và các thông số đã mã hóa được trình bày bằng phương trình đa thức bậc 2 như sau:

$$NPV = 74,352 + 4,12181X_1 + 1,14886X_2 + 1,55036X_3 + 21,6835X_4 - 2,04172X_1^2 - 0,230523X_2^2 - 0,137151X_3^2 - 10,2191X_4^2 + 0,0580482X_1X_2 + 0,0512975X_1X_3 + 0,8224X_1X_4 + 0,0122789X_2X_3 + 0,30085X_2X_4 + 0,320351X_3X_4 \quad (23)$$

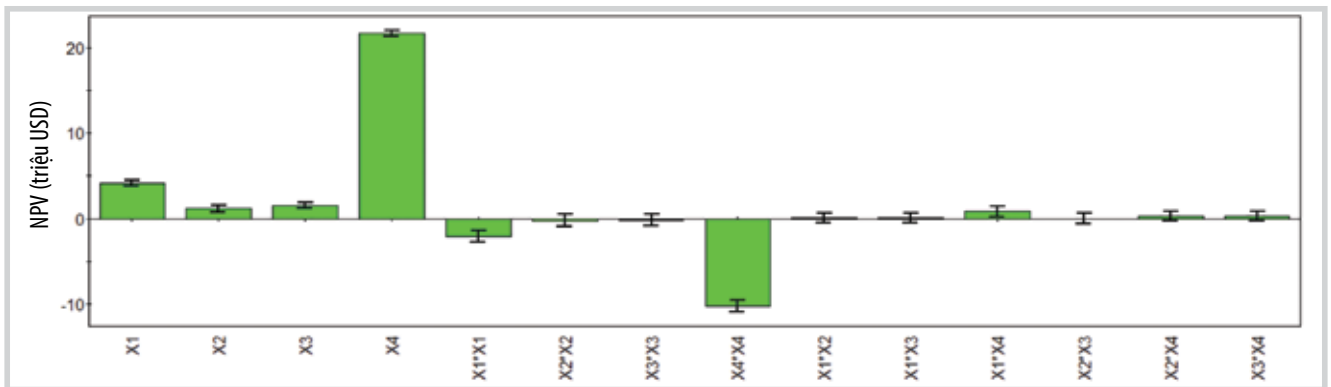
10.1. Ảnh hưởng và sự tương tác của các thông số lên NPV

Hình 2 cho thấy đồ thị biểu diễn ảnh hưởng và sự tương tác của các thông số đối với NPV. Đồ thị cho thấy 2 vùng rõ rệt, bao gồm vùng có các hệ số của các thông số nhỏ hơn 0 và vùng có các hệ số của các thông số lớn hơn 0.

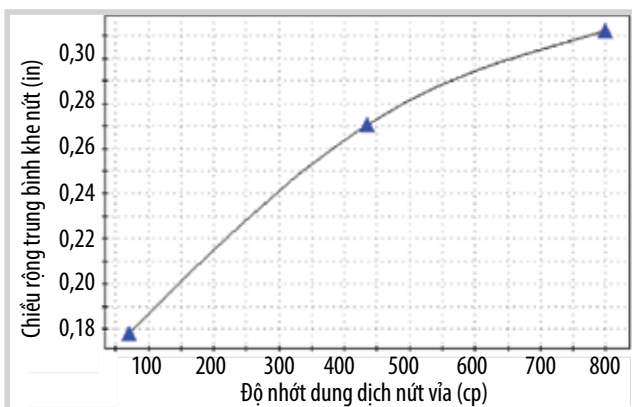
Bảng 9. Giải thích các hệ số có trong mô hình hồi quy (23) của NPV

NPV (triệu USD)	Hệ số	Độ lệch chuẩn (SE coefficient)	P	Khoảng tin cậy
Hằng số	74,352	0,53067	8,42E-18	1,1824
X1	4,12181	0,153191	1,16E-10	0,3413
X2	1,14886	0,153191	2,06E-05	0,3413
X3	1,55036	0,153191	1,42E-06	0,3413
X4	21,6835	0,153191	7,61E-18	0,3413
X1*X1	-2,04172	0,315812	7,21E-05	0,7037
X2*X2	-0,230523	0,315812	0,482177	0,7037
X3*X3	-0,137151	0,315812	0,673305	0,7037
X4*X4	-10,2191	0,315812	1,87E-11	0,7037
X1*X2	0,0580482	0,265335	0,831227	0,5912
X1*X3	0,0512975	0,265335	0,850571	0,5912
X1*X4	0,8224	0,265335	0,0112607	0,5912
X2*X3	0,0122789	0,265335	0,964001	0,5912
X2*X4	0,30085	0,265335	0,283308	0,5912
X3*X4	0,320351	0,265335	0,255081	0,5912

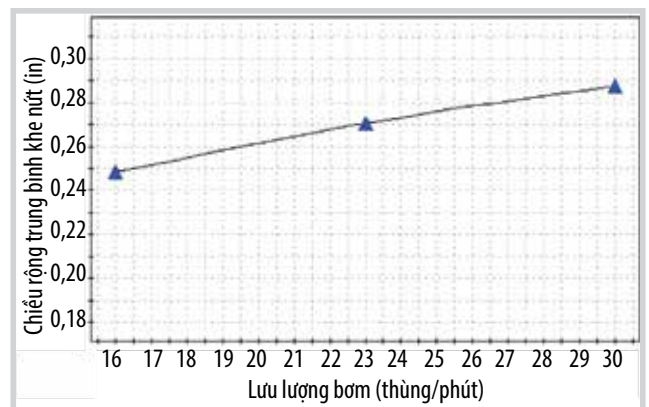
Khoảng tin cậy (Confident level) = 95%



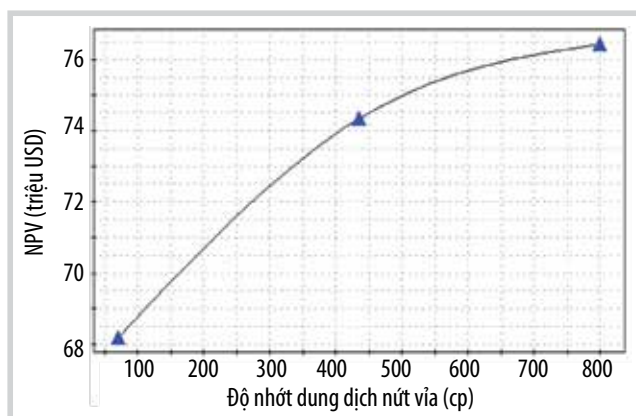
Hình 2. Mức độ ảnh hưởng và sự tương tác của các thông số lên NPV.



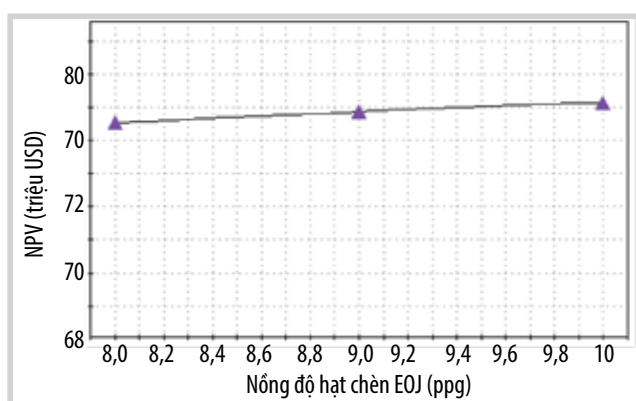
Hình 3. Ảnh hưởng của độ nhớt lên chiều rộng trung bình của khe nứt.



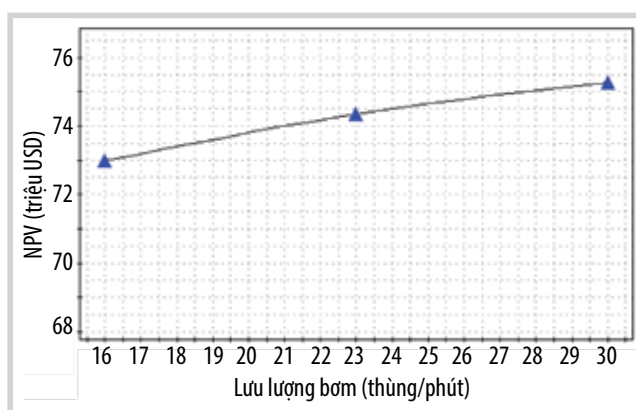
Hình 4. Ảnh hưởng của lưu lượng bơm tới chiều rộng trung bình của khe nứt.



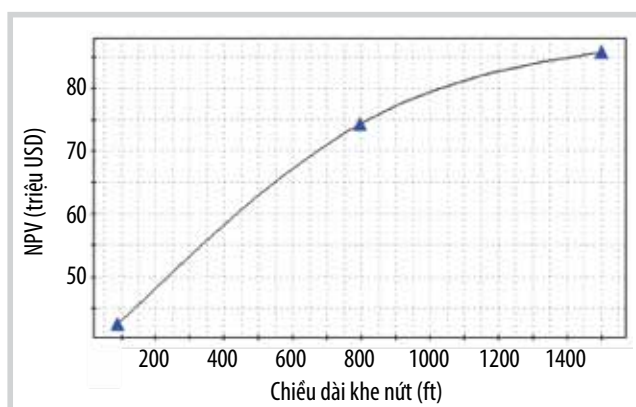
Hình 5. Ảnh hưởng của độ nhớt dung dịch nứt vỉa lên NPV.



Hình 6. Ảnh hưởng của nồng độ hạt chèn lên NPV.



Hình 7. Ảnh hưởng của lưu lượng bơm lên NPV.



Hình 8. Ảnh hưởng của chiều dài khe nứt lên NPV.

Cụ thể, vùng thứ I hiển thị các hệ số của các biến và các hệ số do tương tác của các biến lớn hơn 0 gồm: Độ nhớt; lưu lượng bơm; nồng độ hạt chèn EOJ; chiều dài khe nứt; độ nhớt với lưu lượng bơm; độ nhớt với nồng độ hạt chèn; độ nhớt với chiều dài khe nứt; lưu lượng bơm với nồng độ hạt chèn; lưu lượng bơm với chiều dài khe nứt; nồng độ hạt chèn với chiều dài khe nứt. Các hệ số này phản ánh sự biến đổi NPV khi các biến và sự tương tác của các biến này thay đổi.

Các hệ số của các biến số và các hệ số tương tác các biến số ở vùng thứ I phản ánh sự tăng lợi nhuận ròng do: biến số độ nhớt có hệ số cao thứ 2 trong số các hệ số của 4 thông số, $\beta_1 = 4,12181$. Bởi vì chiều rộng khe nứt và chiều dài khe nứt tỷ lệ thuận với độ nhớt, độ nhớt tăng làm giá trị dẫn suất khe nứt tăng, dẫn tới tăng chỉ số (NPV) do chỉ số khai thác gia tăng. Biến số lưu lượng bơm có hệ số thấp nhất trong số các hệ số của các biến số, $\beta_2 = 1,14886$, phản ánh sự gia tăng NPV đứng thứ 4, bởi vì lưu lượng bơm tỷ lệ thuận chiều rộng khe nứt, kết quả làm tăng dẫn suất khe nứt và tác động làm tăng NPV. Biến nồng độ hạt chèn có hệ số cao thứ tư, $\beta_3 = 1,55036$, phản ánh xu thế tăng NPV bởi vì nồng độ hạt chèn làm tăng dẫn suất khe nứt, dẫn tới tăng NPV. Thông số chiều dài khe nứt có hệ số cao nhất, $\beta_4 = 21,6835$, phản ánh NPV tăng do chiều dài khe nứt tăng dẫn tới đòi hỏi yêu cầu khối lượng hạt chèn tăng; mức độ phân bố hạt chèn bên trong khe nứt cao hơn làm tăng dẫn suất khe nứt và kết quả tăng NPV do chỉ số khai thác tăng lên. Sự tương tác của 4 biến số độc lập khác nhau cũng làm tăng lợi nhuận ròng NPV do làm tăng dẫn suất khe nứt.

Vùng thứ II biểu diễn các hệ số của các biến, và các hệ số từ sự tương tác của các biến nhỏ hơn 0, cụ thể là: Độ nhớt với độ nhớt, lưu lượng bơm với lưu lượng bơm, nồng độ hạt chèn với nồng độ hạt chèn, chiều dài khe nứt với chiều dài khe nứt. Phần mềm thiết kế mô hình hóa của phần mềm thí nghiệm 9.1 (Modde 9.1) được sử dụng để phân tích ảnh hưởng của các hệ số của các biến và sự tương tác lên NPV (Hình 2). Các hệ số của các biến và các hệ số là kết quả từ sự tương tác của các biến được trình bày trong Bảng 9.

10.2. Ảnh hưởng của độ nhớt lên NPV

Hình 5 cho thấy NPV tăng mạnh khi độ nhớt của dung dịch nứt vỉa tăng từ 70 cp lên 450 cp và sau đó NPV chỉ tăng nhẹ khi độ nhớt tăng từ 450 cp lên 800 cp (Rahman và cộng sự, 2007). Điều này do độ nhớt dung dịch nứt vỉa tăng dẫn đến sự gia tăng chiều rộng khe nứt (Valko's & Economides, 1995; Economides, 1994) và dung dịch nứt vỉa có độ nhớt cao cũng làm tăng tổng chi phí xử lý nứt vỉa thủy lực.

10.3. Ảnh hưởng của nồng độ hạt chèn lên NPV

Hình 6 cho thấy ảnh hưởng của nồng độ hạt chèn lên NPV: NPV tăng mạnh khi nồng độ hạt chèn EOJ (ppg) tăng (dẫn đến tăng độ dẫn suất khe nứt). Ngoài ra, giá trị độ dẫn suất còn phụ thuộc vào sự phân bố hạt chèn trong khe nứt, loại hạt chèn, áp suất đóng. Đáng chú ý là nồng độ hạt chèn EOJ tăng từ 8 ppg lên 10 ppg thì giá trị lợi nhuận ròng NPV cũng tăng từ 72,5 triệu USD lên 75,9 triệu USD.

10.4. Ảnh hưởng của lưu lượng bơm lên NPV

Hình 7 biểu diễn mối quan hệ của NPV với lưu lượng bơm của nứt thủy lực. Trong khoảng lưu lượng bơm từ 16 - 30 thùng/phút, NPV chỉ tăng thêm 2,5 triệu USD, từ 72,8 triệu USD lên 75,3 triệu USD. Như trong Hình 4, chiều rộng của khe nứt trung bình tỷ lệ thuận với lưu lượng bơm. Do đó, lưu lượng bơm tăng dẫn đến tăng chiều rộng khe nứt trung bình, tăng độ dẫn suất của khe nứt và kết quả là làm tăng NPV.

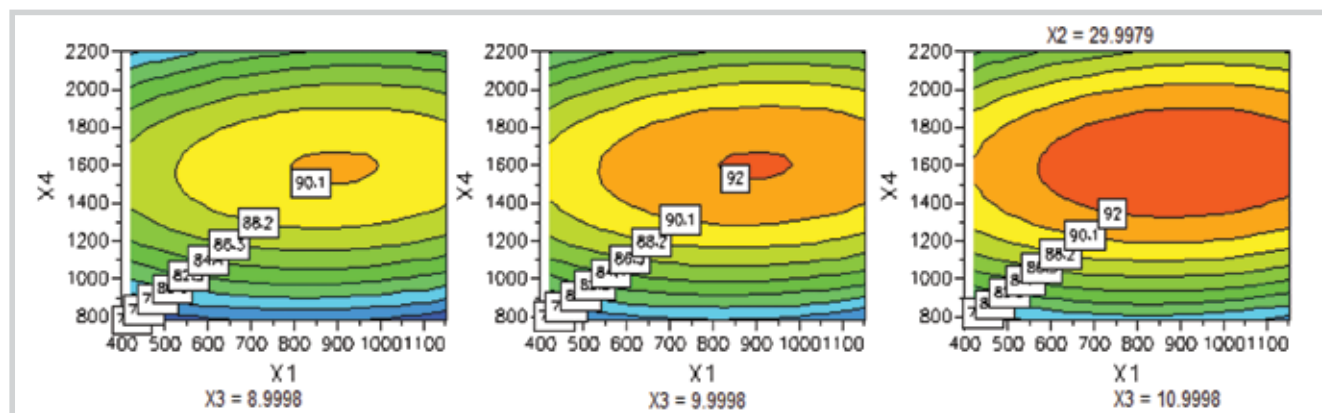
10.5. Ảnh hưởng của chiều dài khe nứt lên NPV

Meng và Brown (1987) nghiên cứu rằng NPV của nứt via thủy lực tăng khi chiều dài của khe nứt tăng. Nghiên

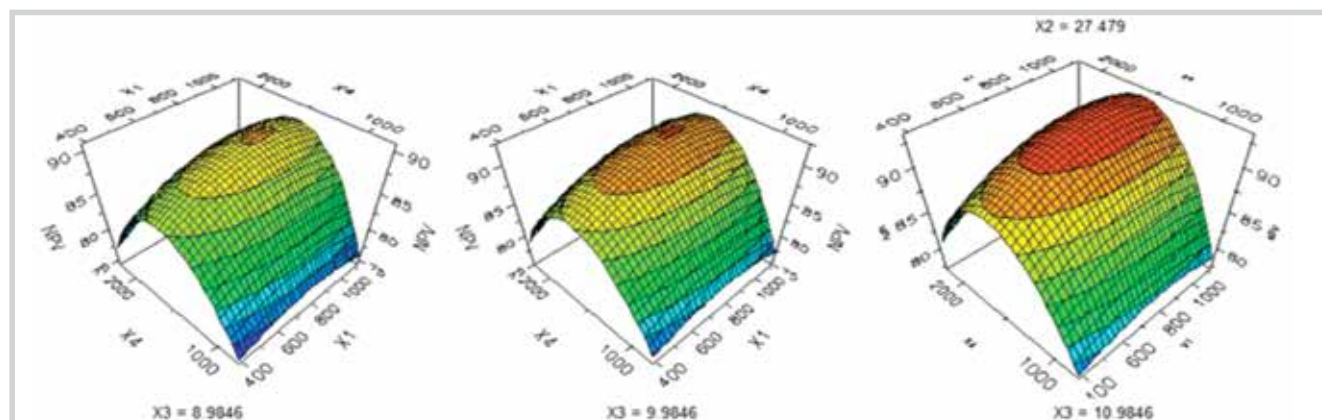
cứ còn cho thấy sản lượng dầu cộng dồn (thùng) tăng khi chiều dài khe nứt tăng làm dẫn suất của khe nứt tăng. Hình 8 trình bày một mối quan hệ phi tuyến tương đối giữa chiều dài khe nứt với NPV. Trong khoảng từ 90 - 795 ft, giá trị hiện tại ròng của nứt via thủy lực tăng từ 38 triệu USD lên 75,17 triệu USD, tức là tăng đến 37,17 triệu USD. Kết quả này là do dẫn suất khe nứt tăng mạnh khi chiều dài khe nứt tăng, tác động đến NPV. Trong khoảng từ 795 - 1500 ft, NPV tăng nhẹ từ 75,17 triệu USD lên 88,1 triệu USD, do mức độ dẫn suất khe nứt tăng ít hơn khi chiều dài của khe nứt dài hơn. Ngoài ra, tổng chi phí xử lý nứt via thủy lực bao gồm dung dịch nứt via yêu cầu, khối lượng hạt chèn yêu cầu đều tăng lên khi tăng chiều dài khe nứt, khiến NPV tăng chậm lại.

10.6. Tối ưu các thông số sử dụng phương pháp bề mặt đáp ứng (RSM)

Biểu đồ đường được tạo ra từ mô hình đầy đủ hiển thị trong công thức (23) để dự báo mối quan hệ giữa các biến độc lập và sự tương tác lên NPV. Biểu đồ các bề mặt đáp ứng và các biểu đồ đường cho thấy ảnh hưởng lên NPV của 4 thông số gồm hệ số thất thoát, lưu lượng bơm, thời gian bơm và nồng độ hạt chèn EOJ, tương ứng biểu diễn trong



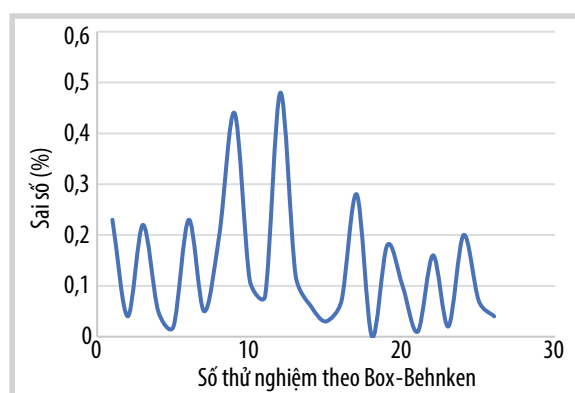
Hình 9. Biểu đồ mô tả ảnh hưởng của các thông số lên NPV.



Hình 10. Biểu đồ bề mặt mô tả ảnh hưởng của các biến lên NPV.

Bảng 10. Đánh giá sự tương quan giữa NPV tính toán và NPV dự đoán

TT	Độ nhớt (cp)	Lưu lượng bơm (thùng/phút)	Nồng độ hạt chèn (ppg)	Chiều dài khe nứt (ft)	NPV tính toán (Triệu USD)	NPV dự đoán (Triệu USD)	Tỷ lệ sai số (%)
1	70	16	9	795	66,49	66,96	0,23
2	800	16	9	795	75,17	75,09	0,04
3	70	30	9	795	68,78	69,22	0,22
4	800	30	9	795	77,69	77,58	0,05
5	435	23	8	90	41,14	41,1	0,02
6	435	23	10	90	43,11	43,56	0,23
7	435	23	8	1500	84,15	84,06	0,05
8	435	23	10	1500	87,4	87,8	0,2
9	70	23	9	90	38	37,12	0,44
10	800	23	9	90	43,49	43,72	0,11
11	70	23	9	1500	79,23	79,08	0,08
12	800	23	9	1500	88,01	88,97	0,48
13	435	16	8	795	71,16	71,39	0,12
14	435	30	8	795	73,61	73,74	0,06
15	435	16	10	795	74,51	74,46	0,03
16	435	30	10	795	77,02	76,87	0,07
17	70	23	8	795	66,12	66,68	0,28
18	800	23	8	795	74,82	74,82	0
19	70	23	10	795	69,33	69,68	0,18
20	800	23	10	795	78,24	78,03	0,1
21	435	16	9	90	41,37	41,38	0,01
22	435	30	9	90	42,77	43,09	0,16
23	435	16	9	1500	84,35	84,31	0,02
24	435	30	9	1500	86,95	87,36	0,2
25	435	23	9	795	74,35	74,48	0,07
Các thông số tối ưu	758,758	27,5	9,98	1491	91,6	91,48	0,06



Hình 11. Sai số giữa giá trị NPV tính toán so với NPV dự đoán.

Hình 9 và 10. Dự đoán giá trị lớn nhất NPV được giới hạn bằng bề mặt đáp ứng bao phủ trên hình elip nhỏ nhất. Các đường bao elip sẽ được tạo ra một cách rõ ràng khi có sự tương tác giữa các biến độc lập. Đường bao 2 chiều (2D) và biểu đồ bề mặt đáp ứng 3 chiều (3D) cho thấy khu vực tối đa cho NPV thu được ở các thông số tối ưu có trong Hình 9 và 10. Một khu vực tối ưu hóa sẽ được xác định bởi diện tích hình elip nhỏ nhất màu đỏ trong Hình 9 tại đó NPV tối đa đạt 91,6 triệu USD tương ứng với độ nhớt 758,758 cp, lưu

lượng bơm 27,5 thùng/phút, nồng độ hạt chèn EOI là 9,98 ppg, và chiều dài khe nứt 1.491 ft. Các thông số tối ưu cần phải xem xét trước khi áp dụng cho thiết kế tối ưu nhằm đạt NPV tối đa thông qua kiểm tra sự đúng đắn của mô hình công thức (23).

10.7. Kiểm tra mô hình

Để kiểm tra mức độ chính xác của 4 thông số tối ưu, nghiên cứu tiến hành đánh giá NPV lớn nhất tại 4 thông số tối ưu theo mô hình 23 so với NPV lớn nhất tại 4 thông số tối ưu theo phần mềm Modde 5.0. Mô hình trong công thức (23) biểu diễn mối quan hệ của 4 biến đã mã hóa với giá trị tính toán NPV. Mô hình trong công thức (24) thể hiện mối quan hệ của 4 thông số ban đầu chưa mã hóa với giá trị tính toán NPV như sau:

$$\begin{aligned}
 NPV = & 4,51750 + 0,0202740X_1 + 0,301661X_2 + 3,53813X_3 \\
 & + 0,0565675X_4 - 1,53250 \times 10^{-5}X_1^2 - 0,00467687X_2^2 - 0,136667X_3^2 \\
 & - 2,05556 \times 10^{-5}X_4^2 + 2,25049 \times 10^{-5}X_1X_2 + 0,000143836X_1X_3 \\
 & + 3,19635 \times 10^{-6}X_1X_4 + 0,00214286X_2X_3 \\
 & + 6,07903 \times 10^{-5}X_2X_4 + 0,000453901X_3X_4 \quad (24)
 \end{aligned}$$

Hình 11 cho thấy tỷ lệ sai số là 0,06% giữa NPV tối đa tính toán đạt 91,48 triệu USD so với NPV tối đa đạt 91,6 triệu USD theo

phần mềm Modde 5.0. Điều đó cho thấy các thông số tối ưu bao gồm độ nhớt 758,758 cp, lưu lượng bơm 27,5 thùng/phút, nồng độ hạt chèn EOJ là 9,98 ppg và chiều dài khe nứt 1.491 ft được dùng để thiết kế cho phương án này.

11. Kết luận

- Sự tương tác các thông số độ nhớt, lưu lượng bơm, nồng độ hạt chèn và chiều dài khe nứt với nhau đều tác động đến NPV trong thiết kế nứt vỉa thủy lực.
- Các thông số độ nhớt, lưu lượng bơm, nồng độ hạt chèn và chiều dài khe nứt đều ảnh hưởng đến tăng NPV, trong đó chiều dài khe nứt ảnh hưởng tăng mạnh nhất.
- Thiết kế nứt vỉa thủy lực được tối ưu theo tiêu chí tối đa NPV, trong đó thiết kế các thông số trước khi tiến hành nứt vỉa thủy lực rất quan trọng nhờ hiệu quả kinh tế mà nó mang lại. Kết quả chỉ ra rằng các thông số tối ưu cho nghiên cứu này là độ nhớt 758,758 cp, lưu lượng bơm 27,5 thùng/phút, nồng độ hạt chèn EOJ là 9,98 ppg và chiều dài khe nứt 1.491 ft.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Dầu khí Việt Nam trong khuôn khổ đề tài mã số GV2006.

Tài liệu tham khảo

- [1] H.Z. Meng and K.E. Brown, "Coupling of production forecasting, fracture geometry requirements and treatment scheduling in the optimum hydraulic fracture design", *SPE/DOE Joint Symposium on Low Permeability Reservoirs, Denver, Colorado, 18 - 19 May 1987*. DOI: 10.2118/16435-MS.
- [2] Tamir M. Aggour and Micheal J. Economides, "Optimization of the performance of high-permeability fractured wells", *SPE Formation Damage Control Conference, Lafayette, Louisiana, 18 - 19 February 1998*. DOI: 10.2118/39474-MS.
- [3] R.A. Langedijk, S. Al-Naabi, H. Al-Lawati, R. Pongratz, M.P. Elia, and T. Abdulrab, "Optimization of hydraulic fracturing in a deep, multilayered, gas-condensate reservoir", *SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Dallas, Texas, 1 - 4 October 2000*. DOI: 10.2118/63109-MS.
- [4] Z. Yang, D.G. Crosby, and A.K. Khurana, "Multivariate optimization of hydraulic fracture design", *Australian Petroleum Production and Exploration Association Journal*, Vol. 42, pp. 516 - 527, 1996.
- [5] M.J. Economides, R. Oligney, and P.Valko, "Unified fracture design". Orsa Press, 2002.
- [6] K.D. Mahrer, "A review and perspective on far-field hydraulic fracture geometry studies", *Journal of Petroleum Science and Engineering*, Vol. 24, pp. 13 - 28, 1999.
- [7] C.W. Hopkins, "The importance of in-situ-stress profiles in hydraulic-fracturing applications", *Journal of Petroleum Technology*, Vol. 49, No. 9, pp. 944 - 948, 1997. DOI:10.2118/38458-JPT.
- [8] N.R. Warpinski, R.A. Schmidt, and D.A. Northrop, "In-situ stresses: The predominant influence on hydraulic fracture containment", *Journal of Petroleum Technology*, Vol. 34, pp. 653 - 664, 1982. DOI: 10.2118/8932-PA.
- [9] Dora Patricia Resterepo, *Pressure behavior of a system containing multiple vertical fractures*. University of Oklahoma, USA, 2008.
- [10] M. King Hubbert and David G. Willis, "Mechanics of hydraulic fracturing", *Petroleum Transactions, AIME*, Vol. 210, pp. 153 - 168, 1957.
- [11] Nguyen Binh Thi Thanh, Tomochika Tokunaga, and Akihiko Okui, "In-situ stress and pore pressure fields in the North Cuu Long basin, offshore Vietnam", *SPE Asia Pacific Conference on Integrated Modelling for Asset Management, Kuala Lumpur, Malaysia, 29 - 30 March 2004*.
- [12] M.Y. Lee and B.C. Haimson, "Statistical evaluation of hydraulic fracturing stress measurement parameters", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics*, Vol. 26, No. 6, pp. 447 - 456, 1989.
- [13] I.M. Breckels and H.A.M Van Eekelen, "Relationship between horizontal stress and depth in sedimentary basins", *Journal of Petroleum Technology*, Vol. 34, No. 9, pp. 2191 - 2199, 1982. DOI: 10.2118/10336-PA.
- [14] T. K. Perkins and L.R. Kern, "Widths of hydraulic fractures", *Journal of Petroleum Technology*, Vol. 13, No. 9: pp. 937 - 949, 1961. DOI: 10.2118/89-PA.
- [15] R.P. Nordgren, "Propagation of a vertical hydraulic fracture", *Society of Petroleum Engineers Journal*, Vol. 12, No. 4, pp. 306 - 314, 1972. DOI: 10.2118/3009-PA.
- [16] Z. Rahim and S.A. Holditch, "Using a three-dimensional concept in a two-dimensional model to predict accurate hydraulic fracture dimensions", *Journal of Petroleum Science and Engineering*, Vol. 13, pp. 15 - 27, 1995.
- [17] M.M. Hossain, "Reservoir stimulation by hydraulic fracturing: Complexities and remedies with reference to initiation and propagation of induced and natural fractures", University of New South Wales, Sydney, 2001.
- [18] G.C. Howard and C.R. Fast, "Optimum fluid characteristics for fracture extension", *Drilling and Production Practices*, New York, 1957.

- [19] Peter Valkó and Michael J. Economides, *Hydraulic fracture mechanics*. John Wiley and Sons. 1995.
- [20] K.G. Nolte, "Determination of proppant and fluid schedules from fracturing pressure decline", *SPE Production Engineering*, Vol. 1, No. 4, pp. 255 - 265, 1986. DOI: 10.2118/13278-PA.
- [21] Robert S. Schechter, *Oil well stimulation*. Prentice Hall, 1991.
- [22] M.B. Smith, *Hydraulic Fracturing*. Second Edition, Tulsa, OK: NSI Technologies, 1997.
- [23] Michael J. Economides, A. Daniel Hill, Christine Ehlig-Economides, and Ding Zhu, *Petroleum production systems*. Prentice Hall PTR, New Jersey, 1994.
- [24] P. Valko, R.E. Oligney, and M.J. Economides, "High permeability fracturing of gas wells", *Petroleum Engineer International*, Vol. 71, No. 1, 1998.
- [25] M.J. Economides, P.P. Valko, and X. Wang, "Recent advances in production engineering", *Journal of Canadian Petroleum Technology*, Vol. 40, No. 10, pp. 35 - 44, 2001. DOI:10.2118/01-10-01.
- [26] J.A. Cornell, *How to apply response surface methodology (2nd edition)*. American Society for Quality Control, 1990.
- [27] D.C. Montgomery, *Design and Analysis of Experiments (5th edition)*. John Wiley & Sons, 2001.
- [28] Raymond H. Myers, Douglas C. Montgomery, and Christine M. Anderson-Cook, *Response surface methodology: Process and product optimization using designed experiments (3rd edition)*. John Wiley and Sons, 2008.
- [29] George Edward Pelham Box and Norman R. Draper, *Empirical model building and response surfaces*. John Wiley & Sons, 1987.
- [30] G.E.P. Box George and D.W. Behnken, "Some new three level designs for the study of quantitative variables", *Technometrics*, Vol. 2, No. 4, pp. 455 - 475, 1960. DOI: 10.2307/1266454.
- [31] Samyak Jain, Andrew Richard Prestridge, Paul Dellorusso, Nghi Chinh Nguyen, Duong Danh Lam and Vuong Quoc Hung, "Case study from 12 successful years of high temperature fracturing in Bach Ho field offshore Vietnam", *Production and Operations Symposium*, Oklahoma City, Oklahoma, USA, 2007. DOI: 10.2118/106712-MS.
- [32] M.M. Rahman, M.K. Rahman, and S.S. Rahman, "Optimizing treatment parameters for enhanced hydrocarbon production by hydraulic fracturing", *Journal of Canadian Petroleum Technology*, Vol. 42, No. 6, 2003. DOI: 10.2118/03-06-02.
- [33] Ngoc T.B. Nguyen, Cuong T.Q. Dang, Wisup Bae, and Taemoon Chung, "Integrating geological characterization and historical production analysis to optimize field management of Lower Miocene reservoir in White Tiger field, Vietnam", *Journal of Canadian Petroleum Technology*, Vol. 49, No. 5, pp. 8 - 18, 2010. DOI: 10.2118/137045-PA.
- [34] Vietsovpetro, "Sơ đồ công nghệ hiệu chỉnh Khai thác và xây dựng mỏ Bạch Hổ". 2013.

APPLICATIONS OF RESPONSE SURFACE METHODOLOGY AND BOX-BEHNKEN DESIGN TO OPTIMISE FRACTURE TREATMENT DESIGN FOR LOWER MIOCENE RESERVOIRS, BACH HO FIELD

Nguyen Huu Truong, Ha Nhu Y

Petrovietnam University

Email: truongnh@pvu.edu.vn

Summary

The paper presents the results of application of the response surface method and the Box-Behnken design of experiments to investigate the influence of hydraulic fracturing parameters on the economic performance after fracture treatment in the Lower Miocene reservoirs of Bach Ho field. The four parameters comprising viscosity of fracturing fluid, pump rate, proppant concentration, and fracture length are optimised by maximising net present value (NPV). The NPV is calculated based on the cumulative oil production at the post fractured and the based case under transient flow behaviour for a three-year period. From the results of the sensitivity analysis, it is possible to evaluate the main parameters that affect the net present value (NPV), as well as the interaction of the parameters to the NPV.

Key words: Response Surface Methodology, Box-Behnken design, hydraulic fracturing, Lower Miocene, Bach Ho field.