

NGHIÊN CỨU ẢNH HƯỞNG CỦA CÁC THÔNG SỐ VẬN HÀNH NÚT VĨA TỚI DẪN SUẤT KHE NÚT VÀ KHỐI LƯỢNG HẠT CHÈN KHI THỰC HIỆN BƠM NÚT VĨA TẦNG OLIGOCENE CHẶT SÍT

Nguyễn Hữu Trường¹, Nguyễn Quốc Dũng², Phạm Đình Phi³, Nguyễn Việt Khôi Nguyễn¹

¹Trường Đại học Dầu khí Việt Nam

²Liên doanh Việt - Nga "Vietsovpetro"

³Baker-Hughes

Email: truongnh@pvu.edu.vn

Tóm tắt

Nhóm tác giả sử dụng thiết kế thí nghiệm trực tâm xoay (CCD) và tối ưu bề mặt đáp ứng (RSM) để đánh giá ảnh hưởng của 4 thông số vận hành nút vỉa thủy lực lên dẫn suất của khe nứt khi bơm nút vỉa thủy lực tầng Oligocene. Phương pháp tối ưu bề mặt đáp ứng để tối đa dẫn suất của khe nứt để xác định các thông số vận hành gồm: nồng độ hạt chèn, thời gian bơm, hệ số thất thoát, lưu lượng bơm. Mô hình mối liên hệ giữa hàm mục tiêu là dẫn suất của khe nứt với các thông số vận hành nút vỉa sẽ được xây dựng với $R^2 = 0,995$ và $R^2_{Adj} = 0,990$. Kết quả giá trị dẫn suất khe nứt lớn nhất đạt 1.303md.ft ứng với các giá trị vận hành nút vỉa là hệ số thất thoát: 0,0031ft/min^{0,5}, lưu lượng bơm: 40bpm, nồng độ hạt chèn: 10ppg, thời gian bơm: 96 phút.

Từ khóa: Tối ưu bề mặt đáp ứng, thông số vận hành nút vỉa thủy lực, thí nghiệm trực tâm xoay, Oligocene.

1. Giới thiệu

Sản lượng khai thác dầu của Việt Nam chủ yếu ở đối tượng tầng móng nứt nẻ. Lượng dầu khai thác được ở đối tượng Miocene và Oligocene còn rất hạn chế. Trong nghiên cứu này, nhóm tác giả nghiên cứu nút vỉa thủy lực cho một giếng khoan thăm dò với đối tượng nghiên cứu tập E Oligocene.

Đối với trầm tích tập E của bể Cửu Long phân bố rất rộng trong các khu vực khác nhau như phía Đông Bắc, rìa Đông Bắc, Đông Nam, phía Đông, phía Tây Bắc và rìa Tây Bắc với thành phần thạch học rất khác nhau gồm: sét kết, bột kết, cát kết, cuội kết và trầm tích phun trào và đá phun trào.

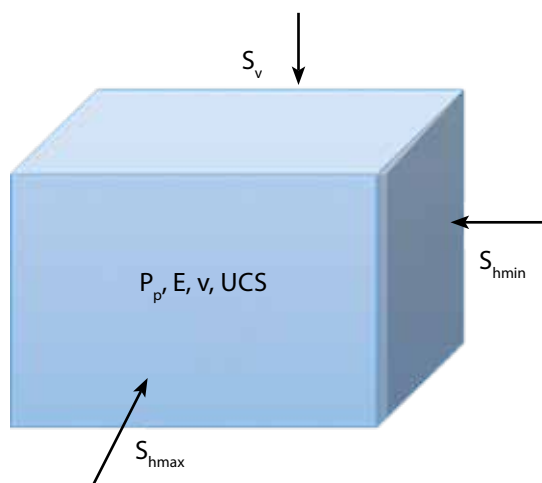
Nhóm tác giả nghiên cứu nút vỉa thủy lực một giếng ở phía Đông Nam của bể Cửu Long. Thành phần thạch học của trầm tích tập E tại các giếng ở khu vực phía Đông Nam phần lớn là cát kết xen kẹp với các lớp phun trào andesite và dolerite. Cát kết tại tập E là cát kết arkose với kích thước hạt trung bình và thô, độ chọn lọc kém - trung bình, đá chứa lượng đáng kể mảnh đá granite (23,4%), khoáng vật thứ sinh là calcite (5 - 10%) và đôi khi lên tới 40%, zeolite

(5 - 10%) có chỗ tới 42%, sét kaolinite (10 - 15%) [1]. Do tính chất của vỉa là dầu cát kết chặt sít; độ thấm thấp trong khoảng từ 0,1 - 5mD và độ rỗng ở mức trung bình trong khoảng từ 10 - 13%; cấu trúc phức tạp, bất đồng nhất; độ sâu lớn; nhiệt độ cao lên tới 260°F [2, 3]; áp suất đóng của khe nứt trong vỉa lớn làm cho sự liên thông của các khe nứt trong vỉa bị hạn chế. Vì vậy, vỉa có dẫn suất của các khe nứt kém, do đó lưu lượng khai thác không tốt như mong muốn. Để tăng lưu lượng khai thác thì phương pháp nút vỉa thủy lực được ưu tiên lựa chọn vì phương pháp này ưu việt hơn so với phương pháp xử lý khác như acid, CO₂, ASP, bơm ép khí nước luân phiên, bơm ép nước, đốt tại chỗ... vì tạo khe nứt mới, dẫn tới tăng sự liên thông giữa các khe nứt trong vỉa dầu chặt sít với nhau, làm tăng lưu lượng khai thác.

Trong thực tế, thiết kế nút vỉa thủy lực được chia làm 2 phần là các thông số điều chỉnh được trên bề mặt như: nồng độ hạt chèn, lưu lượng bơm, thời gian bơm, hệ số thất thoát của hệ dung dịch, loại hạt chèn, khối lượng hạt chèn và các thông số không thể điều chỉnh được như: module đàn hồi của đá, hệ số Poisson, chiều sâu của giếng, áp suất lỗ rỗng, áp suất vỡ vỉa, áp suất địa tĩnh, áp suất đóng của khe nứt, nhiệt độ vỉa, áp suất vỉa. Qua đánh giá module đàn hồi trong phòng thí nghiệm đất đá tầng Oligocene E có module đàn hồi tới 5.000.000psi, hệ số Poisson là 0,25.

Trong công tác nút vỉa thủy lực, giá trị ứng suất ngang nhỏ nhất ứng với chiều sâu tiến hành nút vỉa thủy lực là rất quan trọng vì cho phép lựa chọn loại hạt chèn có cường độ nén phù hợp và đánh giá chính xác giá trị dẫn suất của khe nứt với giá trị ứng suất đóng cụ thể, giá trị này tương đương với áp suất đóng của khe nứt lên tới 9.137psi [3] tại độ sâu 11.482ft. Việc xác định áp suất đóng của khe nứt tương ứng giá trị ứng suất ngang nhỏ nhất được thực hiện theo nhiều cách như: thực nghiệm kiểm tra rò rỉ ngoài hiện trường (LOT), thực nghiệm kiểm tra rò rỉ ngoài hiện trường mở rộng (ELOT) với các cách xác định này áp dụng phương pháp áp suất đáy giếng suy giảm phụ thuộc vào lượng dung dịch nút vỉa thất thoát qua diện tích khe nứt khi thực hiện LOT hay ELOT.

Trước đây đã có nhiều tác giả đưa ra cách xác định ứng suất ngang nhỏ nhất như Hubbert và Willis [4], phương pháp tương quan của Mathew và Kelly [5], phương pháp tương quan của Pennebaker [6], phương pháp tương quan của Eaton [7], công thức Christman [8] và phương pháp MacPherson và Berry [9]. Tuy nhiên, ELOT cho giá trị áp suất đóng của khe nứt chính xác hơn so với phương pháp LOT và các phương pháp trước đây và cho kết quả ngay tại giếng cần nút vỉa. Đối với trường ứng suất thông thường, trong quá trình bơm nút vỉa thủy lực thì khe nứt phát triển theo mặt phẳng có chứa ứng suất thẳng đứng và ứng suất ngang



Hình 1. Phân bố trường ứng suất tại chỗ trong giếng

Bảng 1. Đặc tính của tập vỉa Oligocene dưới [2]

Thông số vỉa	Giá trị
Độ sâu của vỉa	11.480 - 11.560ft
Độ rỗng của vỉa	10 - 13%
Độ thấm vỉa	0,1 - 2mD
Nhiệt độ vỉa	260°F
Tỷ trọng dầu/khí	36/0,77
Độ bão hòa nước	52%
OIIP	176 triệu thùng

lớn nhất và mặt phẳng đó vuông góc với ứng suất ngang nhỏ nhất. Việc xây dựng đường áp suất địa tĩnh thông qua đo tỷ trọng đất đá khoan qua ứng với từng chiều sâu cụ thể, từ đó xây dựng mô hình mối liên hệ giữa áp suất địa tĩnh theo chiều sâu và có độ tin cậy cao. Đối với áp suất lỗ rỗng được xác định thông qua phương pháp khoan ở ngoài hiện trường như phương pháp D_c , phương pháp Eaton [7], phương pháp DST, hay phương pháp tỷ trọng của mùn khoan. Trong nghiên cứu này nhóm tác giả nghiên cứu ảnh hưởng của 4 thông số vận hành nút vỉa thủy lực được điều chỉnh trên bề mặt gồm: hệ số thất thoát (C_f), ft/min²; nồng độ hạt chèn (EOJ), ppg; lưu lượng bơm (q), bpm; thời gian bơm (t), phút tới dẫn suất của khe nứt (md.ft).

2. Sử dụng thiết kế thí nghiệm trực tâm xoay (CCD) và phương pháp bề mặt đáp ứng (RSM)

Phương pháp bề mặt đáp ứng (Response Surface Methodology) được phát triển bởi Cornell [10]; Montgomery [11]; Myers và Montgomery [12]; Myers và nnk [13] để tối ưu 4 thông số vận hành nút vỉa thủy lực được điều chỉnh trên bề mặt sao cho giá trị dẫn suất của khe nứt là tối đa nhất. Mô hình hàm mục tiêu được xây dựng dựa trên mối liên hệ giữa hàm mục tiêu với các thông số vận hành nút vỉa, từ đó phân tích các thông số trong mô hình ảnh hưởng tăng, ảnh hưởng giảm đến dẫn suất của khe nứt tại tầng Oligocene có tính chất dầu chặt sét. Mô hình còn biểu diễn sự tương tác của các thông số vận hành tới dẫn suất của khe nứt. Mô hình khe nứt PKN-C [14] cho thiết kế tầng đất đá dầu chặt sét giới hạn bởi các thông số như hệ số thất thoát, lưu lượng bơm, thời gian bơm, nồng độ hạt chèn. Sử dụng thí nghiệm trực tâm xoay ban đầu được phát triển bởi Box và Wilson [15] về sau mô hình được cải tiến bởi Box và Hunter [16] để thiết kế. Việc sử dụng thiết kế trực tâm xoay có nhiều lợi ích hơn thiết kế thí nghiệm đầy đủ vì mô hình hàm mục tiêu được xây dựng là hàm bậc 2, có tính tới ảnh hưởng sự tương tác của chúng, ảnh hưởng của các thông số chính tới hàm mục tiêu, do đó mô hình có sự tin cậy cao hơn và tổng số thí nghiệm ít hơn, dẫn tới tiết kiệm thời gian, chi phí và tăng tính kinh tế.

Tổng số thí nghiệm theo phương pháp trực giao tâm xoay theo công thức:

$$N = 2^k + 2k + n_o$$

- Phần cơ sở gồm $n = 2^k$ thí nghiệm theo quy hoạch thực nghiệm yếu tố toàn phần.

- Phần tâm gồm n_o ($n_o \geq 1$), thí nghiệm ở tâm phương án dùng để xác định phương sai tái hiện trong công thức kiểm tra ý nghĩa của các hệ số hồi quy.

Mô hình quy hoạch trực giao cấp 2 là quy hoạch thực nghiệm và xử lý số liệu thực nghiệm theo phương pháp xây dựng mô hình hồi quy cấp 2 với các điều kiện tương tự như quy hoạch thực nghiệm yếu tố toàn phần (quy hoạch trực giao cấp 1).

Phương trình hồi quy bậc 2 đầy đủ cho hàm mục tiêu có dạng:

$$y = \beta_0 + \sum_{j=1}^k \beta_j x_j + \sum_{j < i}^k \beta_{ij} x_i x_j + \sum_{j=1}^k \beta_{jj} x_j^2 + \varepsilon \quad (1)$$

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_{jj} : 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_i 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.

- Về dấu của hệ số β :

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

$\beta_i < 0$: 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 quá trình bằng một phương trình. Khi tìm được hàm mục tiêu mô tả đúng thực nghiệm, sẽ tính trước được giá trị hàm mục tiêu, tức là tính được kết quả nghiên cứu mà không cần làm nghiên cứu.

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 cho các thông số vận hành nút vĩa ứng với dẫn suất của khe nút tối đa. 4 thông số vận hành nút vĩa thủy lực là các biến độc lập bao gồm thời gian bơm, lưu lượng bơm, nồng độ hạt chèn, hệ số thất thoát, các biến này là các biến thực nghiệm và hàm mục tiêu sẽ là dẫn suất của khe nút. Để tiện 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:

$$Z_0 = \frac{Z_{min} + Z_{max}}{2}$$

Trong đó:

Z_{max} : Mức trên của thông số vận hành nút vĩa;

Z_{min} : Mức dưới của thông số vận hành nút vĩa;

Z_0 : Mức cơ sở.

Giá trị mã hóa:

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

- Giải bài toán tối ưu theo các bước sau:

+ Tiến hành khảo sát điều kiện biên cho 4 thông số vận hành nút vĩa thủy lực, 4 thông số phải phù hợp với yêu cầu về kỹ thuật, kinh tế khi áp dụng tiến hành bơm nút vĩa thủy lực ở tầng Oligocene dầu chặt sit;

+ 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 R^2 ;

+ Xác định điều kiện tối ưu cho các thông số vận hành nút vĩa thủy lực;

+ Sử dụng phần mềm Modde 5.0 để xác định giá trị dẫn suất tối đa và tìm ra các thông số vận hành nút vĩa tối ưu.

Điều kiện tiến hành sử dụng thiết kế thí nghiệm: Khảo sát ảnh hưởng của 4 thông số vận hành nút vĩa thủy lực độc lập: Hệ số thất thoát (X_1), lưu lượng bơm (X_2), nồng độ hạt chèn (X_3), thời gian bơm (X_4) tới hàm mục tiêu là dẫn suất của khe nút (Y):

- Sử dụng thiết kế thí nghiệm có trục tâm xoay theo phương pháp đáp ứng bề mặt bằng phương trình hồi quy bậc 2. Mô hình toán học mô tả ảnh hưởng của các biến độc lập là các thông số vận hành nút vỉa thủy lực. Đối với biến phụ thuộc là dẫn suất của khe nứt có dạng hàm đa thức bậc 2 như sau:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \beta_4 X_4 + \beta_{11} X_1^2 + \beta_{22} X_2^2 + \beta_{33} X_3^2 + \beta_{44} X_4^2 + \beta_{12} X_1 X_2 + \beta_{13} X_1 X_3 + \beta_{14} X_1 X_4 + \beta_{23} X_2 X_3 + \beta_{24} X_2 X_4 + \beta_{34} X_3 X_4 \quad (2)$$

- Phương trình được xác định dựa trên kết quả kiểm tra chuẩn Fisher. Mức độ phù hợp của mô hình hồi quy được thể hiện qua giá trị của R² cũng như việc xác định điều kiện tối ưu cho dẫn suất khe nứt đạt được xác định trên phần mềm Modde 5.0.

3. Điều khiển logic mờ (Fuzzy Logic)

Nghiên cứu của Zadeh (1965), mạng logic mờ cung cấp quan điểm logic sử dụng những lý do không chắc chắn để bắt chước nhận thức con người. Theo đó cách tiếp cận mới đã mang lại nhiều kết quả thực tiễn và tiếp tục phát triển đó là cách tiếp cận của lý thuyết mờ (Fuzzy Set Theory) [17] do giáo sư Lotfi Zadeh của Trường Đại học Calofonia - Mỹ đề xuất năm 1965. Trong logic rõ thì mệnh đề là câu phát biểu đúng hoặc sai. Trong logic mờ thì mỗi mệnh đề mờ là một câu phát biểu không nhất thiết đúng sai.

4. Hệ mờ Mamdani

Điều khiển Mamdani hay còn gọi là điều khiển ước lượng, là điều khiển mờ đầu tiên được đưa ra. Nó được dùng trong trường hợp cả mệnh đề điều kiện và mệnh đề kết luận đều là các giá trị mờ, dạng tổng quát của mô hình Mamdani [17, 18] như sau:

$$R_j: \text{Nếu } (x_1 \text{ là } A_1^j) \text{ và } \dots \text{ và } (x_m \text{ là } A_m^j) \text{ thì } (y_1 \text{ là } B_1^j), \dots, (y_n \text{ là } B_n^j). \quad (3)$$

Trong đó: m là số tín hiệu vào và n là số tín hiệu ra và J = 1...k với k là số luật điều khiển. Do đó phương pháp Mamdani là một mệnh đề mờ.

5. Hệ mờ Sugeno

Mô hình mờ Sugeno được công bố bởi Takagi, Sugeno và Kang, với mong muốn phát triển một cách tiếp cận có hệ thống nhằm thiết lập luật mờ từ dữ liệu vào ra. Luật mờ cơ bản trong mô hình Sugeno [17, 18] như sau:

$$R_j: \text{Nếu } (x_1 \text{ là } A_1^j) \text{ và } \dots \text{ và } (x_n \text{ là } A_n^j) \text{ thì } y = f_j = r_o^j + \sum_{i=1}^n r_i^j x_i \quad (4)$$

Với các tập mờ điều kiện và y = f_j là một hàm số trong kết luận. Thường thì f_j là đa thức của các biến đầu vào x_i hoặc bất cứ hàm số nào miễn là mô tả phù hợp đầu ra của hệ thống trong miền mờ xác định bởi các tiền đề của luật. Hàm f_j có thể là bậc không, bậc tuyến tính hoặc một đa thức.

6. Phân cụm mờ trừ Subtractive

Phân cụm trừ là một thuật toán nhanh [19], để đánh giá khả năng một mẫu dữ liệu có thể trở thành tâm của một cụm dữ liệu hay không thông qua hàm tính mật độ các mẫu dữ liệu bao quanh mẫu đó, thực tế là khoảng cách giữa các mẫu đó với các mẫu còn lại. Nếu một mẫu dữ liệu có rất nhiều mẫu khác nhau bao quanh trong một phạm vi giới hạn có bán kính r_a thì khả năng trở thành tâm của cụm là rất cao. Một phép đo mật độ tại điểm dữ liệu x_i được định nghĩa là:

$$D_i = \sum_{j=1}^n \exp \left\{ - \frac{|x_i - x_j|^2}{\left(\frac{r_a}{2}\right)^2} \right\} \quad (5)$$

Do đó, một điểm dữ liệu sẽ có giá trị mật độ cao khi có nhiều điểm dữ liệu lân cận.

Tâm cụm đầu tiên x_{c1} được chọn là điểm có giá trị mật độ lớn nhất D_{c1}. Do đó mật độ của mỗi điểm dữ liệu x_i được sửa đổi như sau:

$$D_i = D_i - D_{c1} \sum_{j=1}^n \exp \left\{ - \frac{|x_i - x_{c1}|^2}{\left(\frac{r_b}{2}\right)^2} \right\} \quad (6)$$

Trong đó r_b là hằng số dương xác định vùng lân cận có mật độ giảm.

7. Hệ số thất thoát dung dịch

Hệ số thất thoát của dung dịch nứt vỉa rất quan trọng vì ảnh hưởng tới hiệu quả bơm nứt vỉa thủy lực, khi hệ số thất thoát cao thì thể tích khe nứt tạo ra nhỏ có nghĩa là các chiều của khe nứt giảm sẽ dẫn đến dẫn suất của khe nứt giảm, hơn nữa hệ dung dịch nứt vỉa có hệ số thất thoát càng cao thì hệ dung dịch nứt vỉa có độ nhớt thấp. Ngoài ra hệ số thất thoát còn ảnh hưởng bởi độ thấm của thành hệ, khi độ thấm càng cao thì hệ số thất thoát càng tăng, ngược lại khi độ thấm của vỉa thấp thì hệ số thất thoát giảm. Các yếu tố khác như tổng độ nén của thành phần gồm khí, nước, dầu trong vỉa cũng ảnh hưởng tới hệ số thất thoát dung dịch. Theo Dương Danh Lam và Nguyễn Quốc Dũng [20], để thiết kế hệ dung dịch nứt vỉa tối ưu phải đảm bảo hệ số thất thoát khi thiết kế nứt vỉa thủy lực cho tầng Oligocene chặt sít nằm trong khoảng 0,003 - 0,007ft/min^{0.5}. Độ nhớt của hệ dung dịch còn ảnh

hướng tới hệ số thất thoát và mức độ giữ hạt chèn ở trạng thái lơ lửng, đảm bảo nồng độ hạt chèn trong dung dịch nút vỉa đều, tăng hiệu quả trong quá trình bơm. Độ nhớt của hệ dung dịch nút vỉa phụ thuộc rất nhiều yếu tố như loại polymer, nồng độ polymer cho vào trong hệ dung dịch nút vỉa, nhiệt độ của vỉa, mức độ hệ dung dịch bị hư hại do ảnh hưởng trong điều kiện giếng, loại hóa chất phá vỡ polymer thêm vào (Breaker additive).

Mô hình hệ số thất thoát tổng theo Williams [21] và Williams và nnk [22] như sau:

$$C_l = \frac{-\frac{1}{C_c} + \sqrt{\frac{1}{C_c^2} + 4\left(\frac{1}{C_v^2} + \frac{1}{C_w^2}\right)}}{2\left(\frac{1}{C_v^2} + \frac{1}{C_w^2}\right)} \quad (7)$$

Mô hình hệ số thất thoát được biến đổi dưới dạng

$$\frac{2}{C_l} = \frac{1}{C_c} + \sqrt{\frac{1}{C_c^2} + 4\left(\frac{1}{C_v^2} + \frac{1}{C_w^2}\right)} \quad (8)$$

Trong đó:

C_l : Độ nén tổng (psi⁻¹) được tính như sau:

$$C_l = S_o c_o + S_w c_w + S_g c_g + c_r$$

S_o : Độ bão hòa dầu (%);

c_o : Độ nén của dầu (psi⁻¹);

S_w : Độ bão hòa nước (%);

c_w : Độ nén của nước (psi⁻¹);

S_g : Độ bão hòa khí (%);

c_g : Độ nén của khí (psi⁻¹);

c_r : Độ nén của đất đá trong vỉa (psi⁻¹);

C_v : Hệ số thất thoát do tính chất dung dịch và độ nhớt của dung dịch do thoát qua diện tích khe nứt (ft/min^{0.5});

C_w : Hệ số thất thoát dung dịch nút vỉa qua chiều dày vỏ bùn (ft/min^{0.5});

C_c : Hệ số thất thoát do ảnh hưởng độ nén trong vỉa (ft/min^{0.5});

C_l : Hệ số thất thoát (ft/min^{0.5}).

8. Nồng độ hạt chèn

Việc thiết kế nồng độ hạt chèn phải đảm bảo sao cho khả năng hạt chèn phải đi qua các lỗ bắn mở vỉa một cách tốt nhất. Trường hợp thiết kế nồng độ hạt chèn quá lớn thì trong quá trình bơm nút vỉa thủy lực thường gây ra hiện tượng lỗ bắn mở vỉa bị tạo cầu, tạo đồng hạt chèn ở

Bảng 2. Yêu cầu đường kính lỗ bắn mở vỉa tương ứng kích thước hạt chèn

Kích thước hạt chèn	Yêu cầu đường kính lỗ bắn mở vỉa
6/12	0,8
8/16	0,56
12/20	0,40
16/30	0,28
20/40	0,2
30/50	0,14
40/70	0,1

trong lỗ bắn mở vỉa, làm giảm hiệu quả nút vỉa thủy lực, giảm dẫn suất của khe nứt. Khi hiện tượng tạo cầu xảy ra ở bên trong khe nứt với nồng độ hạt chèn quá cao trong khi bơm thì hiệu quả nút vỉa sẽ giảm thể hiện ở dẫn suất của khe nứt không tốt vì mật độ hạt chèn bên trong một đơn vị diện tích khe nứt giảm và không đồng đều. Theo Dương Danh Lam, Nguyễn Quốc Dũng [20], thiết kế nồng độ hạt chèn nên trong khoảng từ 8 - 10ppg. Bảng 2 thể hiện tiêu chuẩn loại hạt chèn tương ứng với kích thước lỗ bắn mở vỉa, đường kính của lỗ bắn với nồng độ hạt chèn thiết kế để hạt chèn không bị tạo đồng trong đường ống, tránh hiện tượng tạo cầu ở lỗ bắn mở vỉa.

9. Lưu lượng bơm

Để tăng hiệu quả nút vỉa thủy lực cũng như tăng áp suất trong khe nứt, thì áp suất mất qua các lỗ bắn mở vỉa nằm trong khoảng từ 100 - 200psi. Theo kinh nghiệm thiết kế hướng bắn mở vỉa là 60° với 6 lỗ bắn trên 1ft, tốc độ bơm trong khoảng từ 30 - 40pm khi thực hiện bơm nút vỉa tầng Oligocene dưới chặt sét. Tốc độ bơm hợp lý phải đảm bảo vỉa không bị phá hủy. Mô hình áp suất mất qua các lỗ bắn mở vỉa như sau:

$$P_{pf} = \frac{1.975 q^2 \rho_f}{C_D^2 N_p^2 d_p^4} \quad (9)$$

Trong đó:

q: Lưu lượng bơm (gpm);

ρ_f : Nồng độ hạt chèn (ppg);

C_D : Hệ số đục lỗ, 0,95;

N_p : Tổng số lỗ bắn mở vỉa;

d_p : Đường kính lỗ bắn mở vỉa (inch).

10. Dẫn suất của khe nứt

Dẫn suất của khe nứt là thông số quan trọng trong thiết kế nút vỉa thủy lực cho phép chất lưu trong vỉa dễ dàng di chuyển vào các khe nứt đã được tạo ra để đi vào giếng, dựa trên tiềm năng có sẵn của vỉa về phân phối chất lưu đi vào giếng. Giá trị dẫn suất của khe nứt thường

được kiểm tra trong phòng thí nghiệm theo tiêu chuẩn API trên cơ sở loại hạt chèn và kích thước hạt được lựa chọn và áp suất đóng của khe nứt đã được kiểm tra ngoài hiện trường. Thủ tục đo dẫn suất của khe nứt dựa trên dòng chảy tuyến tính đi qua một gói hạt chèn được thiết kế với mật độ 2lb/ft² và được nén ép bởi các tấm thép bằng áp suất đóng của khe nứt. Các số liệu dẫn suất của các loại hạt chèn khác nhau chủ yếu được công bố và đo theo tiêu chuẩn API [23]. Do ảnh hưởng của áp suất đóng, độ thấm của khe nứt bị giảm hơn so với lúc khe nứt chưa bị nén ép, giá trị độ thấm và chiều rộng của khe nứt sau khi kết thúc nứt vỉa cũng được xác định.

Dẫn suất của khe nứt tại chỗ = $k_f w_p$ (md.ft)
 Trong đó: (10)

k_f : Độ thấm của khe nứt dưới áp suất đóng (mD);

w_p : Chiều rộng của khe nứt do hạt chèn tạo ra sau khi khe nứt đóng (inch).

Richardson [24] chỉ ra dẫn suất của khe nứt tại chỗ được xem xét giảm do ảnh hưởng hiện tượng hạt chèn nén ép, dập vỡ vụn, chất lượng hạt chèn, hạt chèn bị quay trở lên trên, độ bền gel của polymer, nhiệt độ vỉa, mức độ hạt chèn bị bám dính bên trong khe nứt, dòng chảy nhiều pha phi Newton, dòng chảy rối, giá trị dẫn suất thực tế giảm từ 50 - 60%.

11. Phương trình cân bằng trong quá trình bơm nứt vỉa thủy lực

Trong quá trình bơm nứt vỉa thủy lực với áp suất cao vào giếng để tạo ra khe nứt, làm cho khe nứt phát triển và lan truyền theo chiều dài, chiều rộng và chiều cao mới. Thể tích bơm vào vỉa bằng thể tích của khe nứt được tạo ra cộng với thể tích dung dịch bị thất thoát qua diện tích khe nứt. Mối liên hệ đó được biểu diễn như sau:

$$V_i = V_f + V_l$$

Trong đó:

V_f : Thể tích bơm vào vỉa (ft³);

V_l : Thể tích khe nứt tạo ra (ft³);

V_i : Thể tích dung dịch thất thoát qua diện tích khe nứt (ft³).

Hiệu quả nứt vỉa thủy lực (η , %) là tỷ số giữa thể tích khe nứt tạo ra (V_f) với tổng thể tích dung dịch bơm vào vỉa (V_i). Khi thể tích dung dịch bị thất thoát qua diện tích khe nứt tăng sau khi kết thúc nứt vỉa thì hiệu quả nứt vỉa giảm, ngược lại khi thể tích dung dịch bị thất thoát qua diện tích khe nứt giảm thì hiệu quả nứt vỉa thủy lực tăng, do ảnh

hưởng của loại dung dịch nứt vỉa, nồng độ polymer, loại polymer, hệ số thất thoát dung dịch nứt vỉa tổng, độ thấm của thành hệ và độ nén ép tổng của vỉa.

12. Yêu cầu khối lượng hạt chèn

Khi thực hiện bơm nứt vỉa thủy lực ứng với một khối lượng hạt chèn nhất định (M_p), xuống giếng để tạo chiều dài và chiều rộng khe nứt, biết hạt chèn có tỷ trọng (ρ_p) và độ rỗng (ϕ), khi đó khối lượng hạt chèn yêu cầu được tính theo công thức sau:

$$M_p = 2x_f h_f w_p (1 - \phi) \rho_p \tag{11}$$

Trong đó:

$2x_f h_f w_p (1 - \phi) \rho_p$ thể hiện thể tích của toàn bộ hạt chèn được bơm vào giếng. Độ lớn nồng độ hạt chèn bên trong khe nứt ảnh hưởng tới dẫn suất của khe nứt dưới tác dụng của áp suất đóng khe nứt nhất định, ở đây áp suất đóng tại tầng Oligocene nghiên cứu là 9.137psi [3], với điều kiện ngoại trừ hiện tượng hạt chèn bám dính vào diện tích khe nứt, hiện tượng hạt chèn chắt đóng bên trong đường ống tubing, hiện tượng tipscreen out, hiện tượng hạt chèn trở ngược lại bề mặt khi thực hiện khai thác, như vậy mật độ hạt chèn được hiểu là tổng khối lượng hạt chèn sử dụng chia cho diện tích khe nứt được tạo ra.

$$C_p = \frac{M_p}{2x_f h_f}$$

Nolte [25], Meng và Brown [26] đã đưa ra mối liên hệ giữa tổng thể tích bơm với thể tích dung dịch bơm khi chưa có hạt chèn và hiệu quả nứt vỉa (η).

$$V_{pad} = \frac{1 - \eta}{1 + \eta} V_i$$

Như vậy khối lượng hạt chèn là:

$$M_p = V_i - V_{pad} = C_f \eta V_i \tag{12}$$

Trong đó:

M_p : Khối lượng hạt chèn (lb);

x_f : Nửa chiều dài khe nứt (ft);

h_f : Chiều cao của khe nứt (ft);

w_p : Chiều rộng của khe nứt do hạt chèn tạo ra sau khi khe nứt đóng (ft);

ϕ : Độ rỗng của hạt chèn (%);

ρ_p : Tỷ trọng của hạt chèn (lb/ft³);

η : Hiệu quả nứt vỉa (%);

C_f : Nồng độ hạt chèn (ppg);

V_i : Tổng thể tích bơm vào vỉa (gallons);

V_{pad} : Thể tích dung dịch bơm vào vỉa khi chưa có hạt chèn (gallons);

C_p : Mật độ hạt chèn trong khe nứt (lb/ft³).

13. Mô hình khe nứt

Các nghiên cứu lý thuyết trước đây đề xuất rất nhiều mô hình khe nứt khác nhau như mô hình khe nứt 2 chiều chưa tính tới hệ số thất thoát của khe nứt bao gồm PKN, GDK và Radial. Tuy nhiên, các mô hình đó thiếu chính xác về chiều dài, chiều rộng và chiều cao của khe nứt trong quá trình bơm nứt vỉa vì thực tế bơm nứt vỉa thủy lực có sự thất thoát dung dịch qua diện tích khe nứt và chế độ chảy của dung dịch nứt vỉa bên trong khe nứt. Ngoài ra, có giả thiết chiều cao khe nứt không thay đổi, do đó đề xuất thêm các mô hình có tính tới hệ số thất thoát dung dịch nứt vỉa, lưu lượng bơm, thời gian bơm, module đàn hồi của đất đá và chế độ chảy của dung dịch nứt vỉa bên trong khe nứt.

Trong nghiên cứu này, nhóm tác giả sử dụng mô hình PKN-C phù hợp tầng đất đá chặt sét Oligocene dưới để nghiên cứu. Năm 1995, Valko và Economides đã có lập luận trong bài giảng dầu khí về mối quan hệ giữa các thông số vận hành nứt vỉa thủy lực như thời gian bơm, lưu lượng bơm, hệ số mất nước, tính chất đất đá tới độ lớn chiều rộng khe nứt tại thân giếng và đề nghị một mô hình biểu diễn các thông số ảnh hưởng tới chiều rộng khe nứt tại thân giếng, w_f dựa trên kết quả ban đầu của mô hình cũ Perkins và Kern [14]; Nordgren [27].

Chiều rộng lớn nhất của khe nứt (w_f) tại thân giếng trong điều kiện mô hình Power Law giới hạn bởi các thông số n , K được cho bởi công thức sau:

$$w_f = 9,15^{2n+2} \times 3,98^{\frac{n}{2n+2}} \left(\frac{1+(\pi-1)n}{n} \right)^{\frac{n}{2n+2}} K^{\frac{1}{2n+2}} \left(\frac{q_i^n}{2} h_f^{1-n} x_f \right)^{\frac{1}{2n+2}} \quad (13)$$

Trong đó:

n : Chỉ số ứng xử của dung dịch nứt vỉa;

K : Chỉ số độ sệt của dung dịch nứt vỉa (pa.sⁿ).

$$E' = \frac{E}{1 - \nu^2}$$

E : Module đàn hồi của đất đá (psi);

E' : Module biến dạng phẳng của đất đá (psi);

ν : Hệ số Poisson.

Năm 2002, Rahman đưa ra mối liên hệ giữa độ nhớt của dung dịch nứt vỉa với các thông số của mô hình Power Law như sau:

$$n = 0,1756(1000\mu) - 0,1233; K = (500\mu - 0,0159) \times 47.880$$

μ : Độ nhớt của dung dịch nứt vỉa (pa.s).

Sử dụng hệ số hình dáng $\pi/5$ của khe nứt theo mô hình PKN và chiều rộng trung bình của khe nứt theo công thức $\bar{w} = \frac{\pi}{5} w_f$ và sử dụng công thức xác định độ lớn của nửa chiều dài khe nứt theo mô hình PKN có tính tới tốc độ thất thoát dung dịch qua diện tích khe nứt. Khi đó, độ lớn diện tích khe nứt được xác định bằng công thức sau:

$$A(t) = \frac{\bar{w} + 2S_p}{4C_i^2 \pi} \times \frac{q}{2} \left[\exp(\beta^2) \operatorname{erfc}(\beta) + \frac{2\beta}{\sqrt{\pi}} - 1 \right]$$

Suy ra nửa chiều dài của khe nứt được rút ra từ công thức tính diện tích khe nứt sẽ là:

$$x_f = \frac{\bar{w} + 2S_p}{4C_i^2 \pi h_f} \times \frac{q}{2} \left[\exp(\beta^2) \operatorname{erfc}(\beta) + \frac{2\beta}{\sqrt{\pi}} - 1 \right] \quad (14)$$

$$\text{Với: } \beta = \frac{2C_i \sqrt{\pi t}}{\bar{w} + 2S_p}$$

Hiệu quả nứt vỉa theo công thức sau:

$$\eta = \frac{\bar{w} h_f x_f}{q t}$$

$$\text{hay } \eta = \frac{\bar{w}(\bar{w} + 2S_p)}{4C_i^2 \pi t} \times \left[\exp(\beta^2) \operatorname{erfc}(\beta) + \frac{2\beta}{\sqrt{\pi}} - 1 \right] \quad (15)$$

Phương trình (14) và (15) dùng để đánh giá độ lớn của chiều dài khe nứt và hiệu quả nứt vỉa trong quá trình nứt vỉa thủy lực khi kể tới các ảnh hưởng của chiều cao khe nứt, hệ số thất thoát dung dịch nứt vỉa, lưu lượng bơm ép và thời gian bơm ép. Công thức (15) biểu diễn hiệu quả nứt vỉa thủy lực; tỷ lệ nghịch với hệ số thất thoát dung dịch và thời gian bơm. Phương trình cân bằng trong khi bơm nứt vỉa có tính tới hệ số Nolte [28] và ảnh hưởng của chiều cao khe nứt, chiều cao thẩm của vỉa [28].

$$\frac{q_i}{x_f h_f} t - 2K_L C_i r_p \sqrt{t} - (\bar{w} + 2S_p) = 0 \quad (16)$$

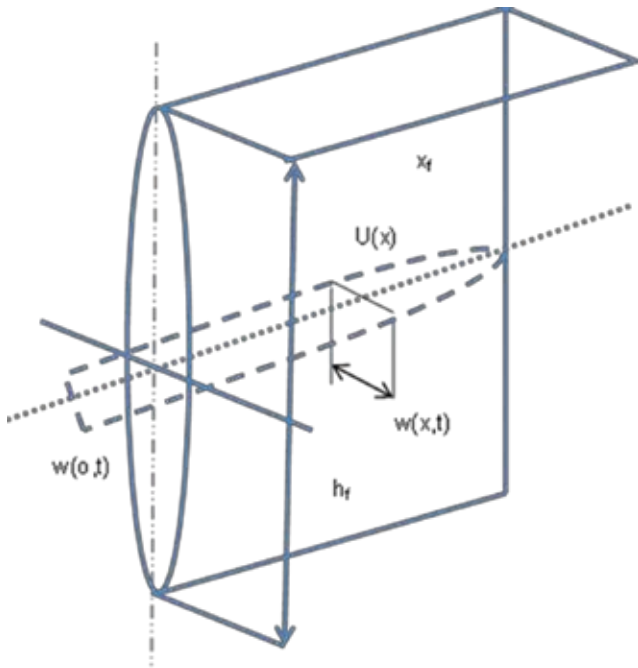
Với t là thời gian bơm, q_i là tốc độ bơm, h_f là chiều cao của khe nứt ảnh hưởng bởi độ cứng của đất đá, K_L là hệ số Nolte, r_p là tỷ số giữa chiều cao khe nứt với chiều dày của vỉa (h_f/h_p).

Trong đó:

q_i : Lưu lượng bơm (bpm);

K_L : Hệ số Nolte liên quan đến hiệu quả nứt vỉa thủy lực;

\bar{w} : Giá trị chiều rộng trung bình của khe nứt ứng với một giá trị chiều dài khe nứt nhất định (inch);



Hình 2. Mô phỏng khe nứt theo mô hình 2D PKN

C_f : Hệ số thất thoát (ft/min^{0.5});

S_p : Hệ số thất thoát dung dịch nứt vỉa qua bề dày của vỏ polymer (gallon/ft²);

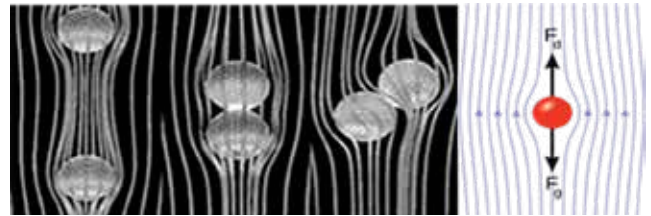
t : Tổng thời gian bơm nứt vỉa thủy lực (phút).

Hệ số Nolte K_L [28] liên quan đến hiệu quả nứt vỉa được cho bởi công thức sau:

$$K_L = \frac{1}{2} \left[\frac{8}{3} \eta + \pi(1 - \eta) \right]$$

14. LỰA CHỌN HẠT CHÈN VÀ HỆ DUNG DỊCH NỨT VỈA

Tầng Oligocene dưới chặt sét có độ sâu lớn, áp suất đóng cao, có chỗ lên tới gần 10.000psi. Việc lựa chọn hạt chèn phải thỏa mãn sao cho hạt chèn có cường độ nén cao và đạt trên áp suất đóng của khe nứt để đảm bảo hạt chèn không bị đập vỡ và có độ thấm ổn định sau khi ngừng nứt vỉa. Vì vậy, hạt chèn có độ nén trung bình là phù hợp, cụ thể loại hạt chèn Carbolite Ceramic chịu được khe nứt có áp suất đóng từ 12.000 - 13.000psi. Việc lựa chọn đúng kích thước hạt chèn như đường kính, tỷ trọng, độ rỗng, mức độ đồng đều nhằm hạn chế hạt chèn bị flowback trở lại bề mặt, các yếu tố này góp phần ảnh hưởng tới dẫn suất của khe nứt. Như vậy, hạt chèn Carbolite Ceramic có kích thước 20/40 là phù hợp. Để tránh hạt chèn sa lắng nhanh trong khi bơm, chất đóng bên trong lỗ bắn mở vỉa và hiện tượng tipscreen out thì lựa chọn hệ dung dịch nứt vỉa phải đảm bảo tối ưu về hệ số thất thoát tổng để tối ưu hiệu quả nứt vỉa, phù hợp với tầng dầu cát kết chặt sét, độ



Kéo Va chạm Hôn Sa lắng

Hình 3. Mô phỏng hạt chèn sa lắng trong dung dịch



Hình 4. Hạt chèn bao phủ toàn khe nứt trước khi đóng (nguồn: Stim-lab, 1994)



Hình 5. Chiều dài khe nứt khi bơm có đáp ứng chiều dài khe nứt theo thiết kế (nguồn: P.E Clark, 2006)

nhớt để giữ hạt chèn luôn ở trạng thái lơ lửng trong quá trình bơm nứt vỉa thủy lực và dễ dàng làm sạch khe nứt bởi chất breaker để tăng dẫn suất khe nứt. Đối với tầng dầu cát kết Oligocene dưới chặt sét có độ thấm, độ rỗng thấp thì lựa chọn hệ dung dịch có độ nhớt phù hợp. Như vậy thông tin hạt chèn và hệ dung dịch nứt vỉa như sau:

14.1. Vận chuyển hạt chèn

Năm 1851, George Gabriel Stokes đưa ra khái niệm về tốc độ sa lắng của vật trong môi trường dung dịch. Theo đó tốc độ sa lắng của hạt chèn đơn theo quy luật Stoke's:

$$V_s = \frac{gd_p^2(\rho_p - \rho_f)}{\mu} \quad (17)$$

Trong đó:

g : Gia tốc trọng trường (9,8m/s²);

d_p : Đường kính trung bình hạt chèn;

ρ_p : Tỷ trọng hạt chèn;

ρ_f : Tỷ trọng của dung dịch nứt vỉa;

μ : Độ nhớt của dung dịch nứt vỉa.

Bảng 3. Thông tin của hạt chèn có cường độ nén trung bình (ISIP)

Các thông số	Giá trị	Giá trị
Loại hạt chèn	20/40 Carbo-lite Ceramic	16/20 Carbo-lite Ceramic
Tỷ trọng (sg)	2,71	2,71
Cường độ nén	Trung bình	Trung bình
Đường kính hạt chèn (inch)	0,0287	0,0394016
Độ rỗng gói hạt chèn (%)	29	26
Độ thấm gói hạt chèn (mD)	100.000	80.000
Dẫn suất hạt chèn tại áp suất đóng 9.137psi, với mật độ hạt chèn 1,37lb/ft ² (md.ft)	1.500	2.400
Hệ số thiệt hại dẫn suất của hạt chèn	0,5	0,5

Bảng 4. Các thông số vận hành nứt vỉa

Các thông số	Giá trị
Chiều cao khe nứt h _r (ft)	77
Hệ số thất thoát dung dịch (ft/min ^{0.5})	0,003 - 0,007
Spurt loss (gal/ft ²)	0,1
Lưu lượng bơm (bpm)	30 - 40
Thời gian bơm (phút)	60 - 100
Nồng độ hạt chèn khi kết thúc nứt vỉa EOJ (ppg)	8 - 10
Chỉ số ứng xử của dung dịch (n)	0,55
Chỉ số độ sệt dung dịch K (lbf.s ⁿ /ft ²)	0,04
Hệ dung dịch nứt vỉa	Fracturing lighting 3500 (LF-3500)
Loại hạt chèn	20/40 ISP Carbolite-Ceramic với tỷ trọng 170lb/ft ³ và hạt chèn 16/20 Carbolite Ceramic với tỷ trọng 170lb/ft ³

Bảng 5. Các thông số vỉa

Thông số	Giá trị
Chiều sâu nứt vỉa (ft)	11.482
Diện tích ảnh hưởng (acres)	122
Bán kính ảnh hưởng, r _e (ft)	1.300
Đường kính tubing, r _w (ft)	0,25
Chiều dày vỉa (ft)	77
Độ rỗng vỉa (%)	12,8
Độ thấm vỉa (md)	0,1
Độ nhớt dầu vỉa, μ _r (cp)	0,5
Hệ số thể tích của vỉa dầu, B ₀ , RB/STB	1,4
Module đàn hồi của đất đá E (psi)	5 × 10 ⁶
Hệ số Poisson, ν	0,25
Áp suất vỉa ban đầu, P _i (psi)	6.000
Nhiệt độ vỉa, T _r (°F)	260
Oil API	40
Tỷ trọng khí (ρ _g /air)	0,707
Áp suất điểm bọt, P _b (psi)	1.310
Áp suất đáy giếng, BHP (psi)	3.500
Áp suất đóng khe nứt, P _c (psi)	9.137

Bảng 6. Ma trận bố trí thí nghiệm mã hóa các biến độc lập [1 - 4]

Nhân tố	Nhân tố gốc	Biến mã hóa X		
		-1	0	1
Hệ số thất thoát (ft/min ^{0.5})	X ₁	0,003	0,005	0,007
Lưu lượng bơm (bpm)	X ₂	30	35	40
Nồng độ hạt chèn (ppg)	X ₃	8	9	10
Thời gian bơm (phút)	X ₄	60	80	100

14.2. Các thông số đầu vào (Bảng 4, 5)

14.3. Đánh giá kết quả

Hệ số hư hại dẫn suất của khe nứt bên trong khe nứt bị giảm còn 50% do nhiều nguyên nhân như: chất lượng hạt chèn, mức độ tròn dẹt hạt chèn, mức độ đập vỡ hạt chèn, cường độ nén hạt chèn, loại hạt chèn, kích thước hạt chèn và mức độ vận chuyển hạt chèn vào bên trong khe nứt, nồng độ hạt chèn bên trong khe nứt, mức độ hạt chèn di chuyển lên trên sau khi kết thúc bơm và đặc biệt là áp suất đóng của khe nứt [24]. Mối liên hệ giữa dẫn suất của khe nứt với 4 thông số vận hành nứt vỉa thủy lực trong khe nứt được tính theo công thức sau:

$$\begin{aligned}
 & \text{Dẫn suất của khe nứt (md.ft)} \\
 & = 544,011 - 252,601X_1 + 113,979X_2 \\
 & \quad + 63,9458X_3 + 102,273X_4 + \\
 & \quad 97,4694X_1^2 + 2,55484X_2^2 + \\
 & 1,50788X_3^2 - 2,67463X_4^2 - 51,2762X_1 \\
 & \quad X_2 - 30,5232X_1X_3 - 50,3563X_1X_4 \\
 & \quad + 14,2002X_2X_3 + 25,5408X_2X_4 + \\
 & \quad 12,9796X_3X_4 \quad (18)
 \end{aligned}$$

Số thiết kế thử nghiệm được tính bởi công thức 2⁴ + 2 × 4 + 3 = 27 của thiết kế trực tâm xoay dựa trên 4 thông số vận hành nứt vỉa gồm lưu lượng bơm, thời gian bơm, hệ số thất thoát dung dịch, nồng độ hạt chèn với số tâm n₀ = 3. Trong mỗi trường hợp thiết kế thử nghiệm trên Bảng 7, các thông số đầu vào gồm: thời

Bảng 7. Kết quả bố trí thí nghiệm đầy đủ theo phương pháp quy hoạch trực tâm xoay

TT	Các biến mã hóa				Các biến thực				Hàm mục tiêu	
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	Hệ số thất thoát (ft/min ^{0.5})	Lưu lượng bơm (bpm)	Nồng độ hạt chèn (ppg)	Thời gian bơm (phút)	Dẫn suất của khe nứt (md.ft)	Khối lượng hạt chèn sử dụng (lbs)
1	-1	-1	-1	-1	0,003	30	8	60	558,4	110.374
2	1	-1	-1	-1	0,007	30	8	60	255,4	41.886,3
3	-1	1	-1	-1	0,003	40	8	60	771,2	164.426
4	1	1	-1	-1	0,007	40	8	60	354,9	63.554,2
5	-1	-1	1	-1	0,003	30	10	60	668,1	137.968
6	1	-1	1	-1	0,007	30	10	60	304	52.357,9
7	-1	1	1	-1	0,003	40	10	60	964	205.533
8	1	1	1	-1	0,007	40	10	60	425,8	79.442,7
9	-1	-1	-1	1	0,003	30	8	100	749,0	159.704
10	1	-1	-1	1	0,007	30	8	100	335,8	59.331,1
11	-1	1	-1	1	0,003	40	8	100	1120,5	238.911
12	1	1	-1	1	0,007	40	8	100	472,8	90.200,6
13	-1	-1	1	1	0,003	30	10	100	936,3	199.630
14	1	-1	1	1	0,007	30	10	100	402,4	74.163,9
15	-1	1	1	1	0,003	40	10	100	1400,6	298.639
16	1	1	1	1	0,007	40	10	100	568,2	112.751
17	-1	0	0	0	0,003	35	9	80	889,8	189.716
18	1	0	0	0	0,007	35	9	80	391,7	71.750,5
19	0	-1	0	0	0,005	30	9	80	454,3	85.952,4
20	0	1	0	0	0,005	40	9	80	637,3	129.913
21	0	0	-1	0	0,005	35	8	80	494,9	95.350,3
22	0	0	1	0	0,005	35	10	80	594,6	119.188
23	0	0	0	-1	0,005	35	9	60	462,1	87.750,3
24	0	0	0	1	0,005	35	9	100	619,0	125.271
25	0	0	0	0	0,005	35	9	80	545,5	107.269
26	0	0	0	0	0,005	35	9	80	545,5	107.269
27	0	0	0	0	0,005	35	9	80	545,5	107.269

Bảng 8. Bảng phân thích ANOVA

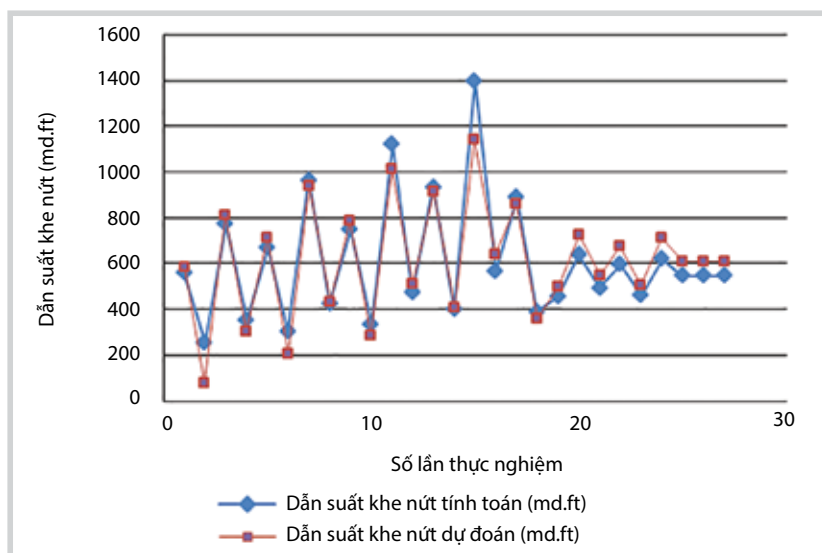
Dẫn suất của khe nứt (md.ft)	Bậc tự do (DF)	Tổng bình phương (SS)	Bình phương trung bình (MS)	Giá trị thống kê (F)	P	SD
Các tham số tham gia hồi quy	14	1.81629E+06	129.735	181.129	0	264,93
Phần dư	12	8595,06	716,255			360,187
Tổng	26	1,82488E+06	70187,8			26,7629

$Q^2 = 0,966; R^2 = 0,995; R^2_{Adj.} = 0,990$

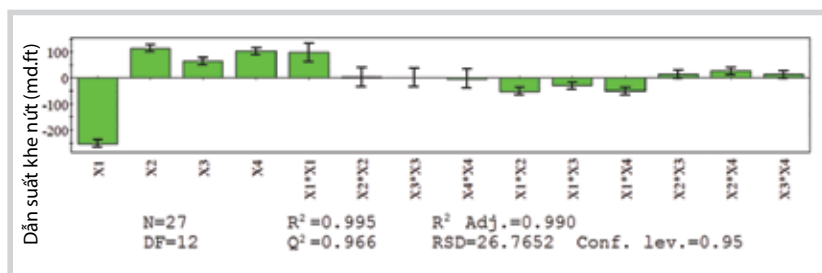
Bảng 9. Giải thích các hệ số có trong mô hình hồi quy (18) của dẫn suất của khe nứt

Dẫn suất của khe nứt (md.ft)	Hệ số	Độ lệch chuẩn (SE Coefficient)	P	Khoảng tin cậy
Hằng số	544,011	9,86251	8,30684E-16	21,4885
X ₁	-252,601	6,30808	3,80104E-14	13,7441
X ₂	113,979	6,30808	4,54882E-10	13,7441
X ₃	63,9458	6,30808	3,09066E-07	13,7441
X ₄	102,273	6,30809	1,59224E-09	13,7441
X ₁ × X ₁	97,4694	16,6896	7,95935E-05	36,3634
X ₂ × X ₂	2,55484	16,6896	0,88088	36,3634
X ₃ × X ₃	1,50788	16,6896	0,9295	36,3634
X ₄ × X ₄	-2,67463	16,6896	0,875344	36,3634
X ₁ × X ₂	-51,2762	6,69073	5,8194E-06	14,5778
X ₁ × X ₃	-30,5232	6,69074	0,000652448	14,5778
X ₁ × X ₄	-50,3563	6,69073	6,98401E-06	14,5778
X ₂ × X ₃	14,2002	6,69073	0,0553015	14,5778
X ₂ × X ₄	25,5408	6,69073	0,00245132	14,5778
X ₃ × X ₄	12,9796	6,69073	0,0762532	14,5778

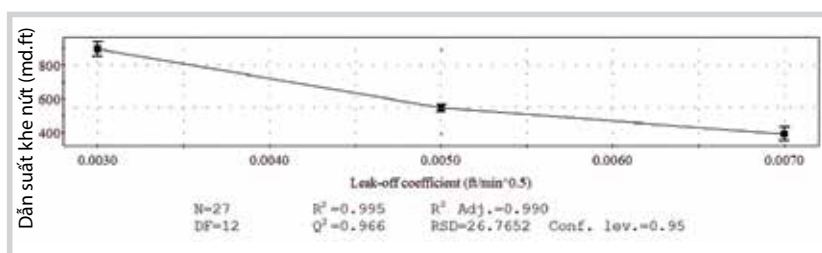
Khoảng tin cậy (confident level) = 95%



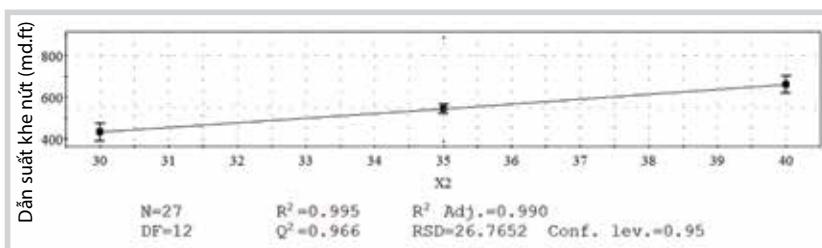
Hình 6. Mối liên hệ giữa số thực nghiệm với dẫn suất khe nứt tính toán và dẫn suất khe nứt dự đoán



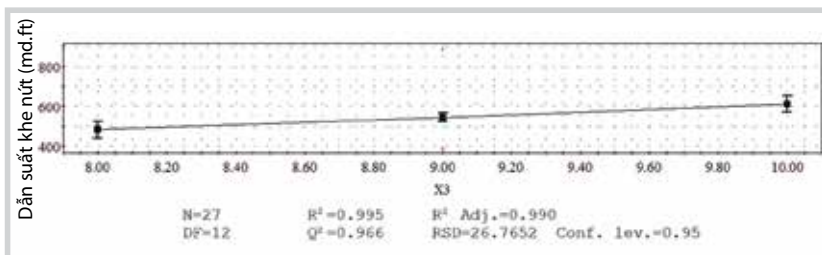
Hình 7. Ảnh hưởng của các thông số vận hành nứt vỉa tới dẫn suất khe nứt



Hình 8. Ảnh hưởng của hệ số thất thoát tới dẫn suất khe nứt

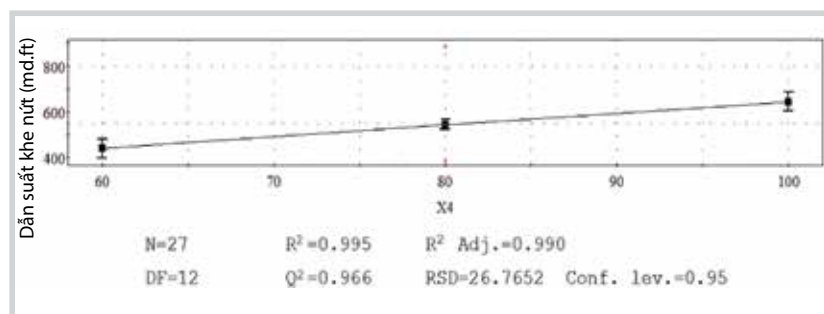


Hình 9. Ảnh hưởng của lưu lượng bơm tới dẫn suất khe nứt

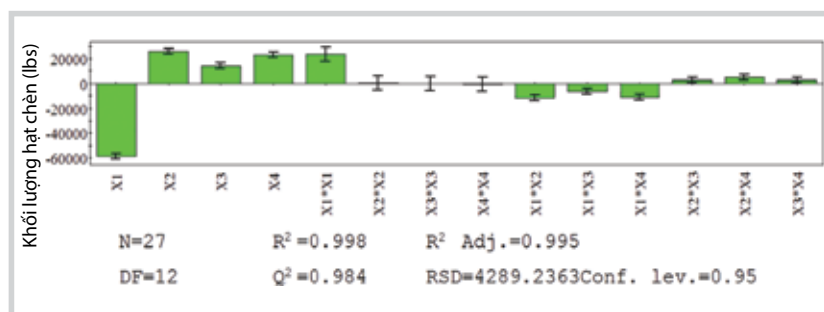


Hình 10. Ảnh hưởng của nồng độ hạt chèn kết thúc bơm tới dẫn suất khe nứt

gian bơm (t), tốc độ bơm (q), hệ số thất thoát dung dịch (C_l), nồng độ hạt chèn (EOJ) trong điều kiện mô hình PKN- C vì mô hình này được phát triển do sự kết hợp phương trình Carter II [29] với mô hình khe nứt ban đầu PKN (Perkins and Kern, 1961 [14]; Nordgren [27]). Mô hình PKN-C [28] hay dùng trong thiết kế nứt vỉa thủy lực cho tầng dầu chặt sét như Oligocene (Rahman và cộng sự [30], Wang và cộng sự, 2004, Holditch, 2006) vì chiều dài khe nứt lớn hơn chiều cao khe nứt (Valko và các cộng sự [31]). Cụ thể ở trường hợp 1 của Bảng 7, thời gian bơm là 60 phút, nồng độ hạt chèn 8ppg, lưu lượng bơm 30bpm và hệ số thất thoát dung dịch $0,003ft/min^{0.5}$ với tầng dầu chặt sét Oligocene dưới có module đàn hồi 5.000.000psi và hệ số Poisson 0,25, chiều dày vỉa 77ft, thì mô hình PKN có kể tới hệ số thất thoát thì khối lượng hạt chèn sử dụng là 110.374lbs với diện tích khe nứt tạo ra là 115.843ft², do đó nồng độ hạt chèn bên trong khe nứt là 0,95lb/ft² với áp suất đóng của khe nứt là 9.137psi. Theo tiêu chuẩn API về dẫn suất của hạt chèn và so sánh với kết quả kiểm tra dẫn suất của khe nứt, ta thu được dẫn suất của khe nứt là 1116,8md.ft trên bề mặt. Do trong điều kiện vỉa sự suy giảm của dẫn suất khe nứt còn 50% do đó dẫn suất thực tế là 558,5md.ft [24]. Tương tự với các trường hợp khác cũng thu được dẫn suất của khe nứt và các kết quả về dẫn suất của khe nứt được đưa trong Bảng 7. Hình 7 biểu diễn ảnh hưởng của các thông số vận hành nứt vỉa tới dẫn suất của khe nứt. Các thông số ảnh hưởng tích cực tới dẫn suất khe nứt như X_2 , X_3 , X_4 , $X_1 \times X_1$, $X_2 \times X_2$, $X_3 \times X_3$, $X_2 \times X_3$, $X_2 \times X_4$, $X_3 \times X_4$. Do đó, khi các thông số này tăng lên thì dẫn suất của khe nứt tăng vì các hệ số của các thông số này đều mang giá trị dương. Đối với các thông số ảnh hưởng không tích cực tới dẫn suất của khe nứt như X_1 , $X_4 \times X_4$, $X_1 \times X_2$, $X_1 \times X_3$, $X_1 \times X_4$ do các hệ số trong các thông số mang giá trị âm, vì khi tăng



Hình 11. Ảnh hưởng của thời gian bơm tới dẫn suất khe nứt



Hình 12. Ảnh hưởng của các thông số vận hành nứt vỉa tới yêu cầu khối lượng hạt chèn

các thông số này sẽ làm giảm dẫn suất của khe nứt. Hình 6 biểu diễn dự đoán dẫn suất của khe nứt theo mô hình (18) và dẫn suất của khe nứt theo tính toán ứng với số lần thực nghiệm. Các điểm trên 2 đường dẫn suất gần như trùng nhau do đó mô hình (18) sát với thực tế tính toán, chứng tỏ mô hình 16 có độ tin cậy cao. Hơn nữa độ tin cậy của mô hình 16 có hệ số tương quan lên tới 99,5% chứng tỏ các thông số trong mô hình được giải thích gần tuyệt đối và chỉ còn 0,5% các thông số trong mô hình chưa được giải thích. Ngoài ra trong các Hình 9 - 11 biểu diễn ảnh hưởng của từng thông số chính tới dẫn suất khe nứt gồm X_2 , X_3 , X_4 . Khi một thông số chính tăng lên trong khi nứt vỉa thủy lực chứng tỏ dẫn suất của khe nứt tăng lên do lưu lượng bơm tỷ lệ thuận với chiều dài và chiều rộng khe nứt dẫn tới dẫn suất khe nứt tăng theo, tương tự với các thông số nồng độ hạt chèn, thời gian bơm. Hình 8 thể hiện khi tăng hệ số thất thoát của dung dịch nứt vỉa chứng tỏ dẫn suất khe nứt giảm vì khi hệ số thất thoát tăng làm giảm chiều dài và chiều rộng của khe nứt, do đó dẫn suất của khe nứt bị giảm. Hình 12 thể hiện các thông số ảnh hưởng tới yêu cầu khối lượng hạt chèn trong nứt vỉa thủy lực, các thông số ảnh hưởng tích cực tới việc sử dụng khối lượng hạt chèn gồm X_2 , X_3 , X_4 và các thông số khác. Hơn nữa giá trị module đàn hồi của đá ảnh hưởng tới hình dạng và áp suất khe nứt khi thực hiện nứt vỉa thủy lực [32], với module đàn hồi của đá thấp hơn thì khi nứt vỉa sẽ cho chiều rộng khe nứt lớn hơn và chiều dài khe nứt ngắn hơn [33]. Đối với tập E của vùng nghiên cứu thì tính chất vỉa kém do có sự xuất hiện từ các loại khoáng vật rất phức tạp xen kẽ, sự kết hợp của cát kết, sét kết và tui núi lửa và có sự nén chặt rất lớn. Do đó hiệu quả nứt vỉa thủy lực đối với tập cát kết cho hình dáng khe nứt lớn hơn do độ rỗng và độ thấm tốt hơn. Đối với đất đá nén chặt xen kẽ với tập cát kết thì hiệu quả nứt vỉa kém do tính thấm, rỗng kém và có module đàn hồi của đá lớn hơn, hệ số Poisson cao hơn.

15. Kết luận

Nghiên cứu ảnh hưởng của các thông số vận hành nứt vỉa tới dẫn suất của khe nứt, trong điều kiện mô hình khe nứt PKN-C cho nứt vỉa tầng đất đá chặt sét Oligocene rút ra một số kết luận sau:

- Hệ số thất thoát dung dịch nứt vỉa tăng ảnh hưởng tiêu cực tới dẫn suất của khe nứt và giảm hiệu quả nứt vỉa thủy lực, ảnh hưởng tiêu cực tới hình dáng khe nứt.

- Khi tăng thời gian bơm, lưu lượng bơm và nồng độ hạt chèn có ảnh hưởng tăng dẫn suất của khe nứt. Tuy nhiên, cần chọn thông số lưu lượng bơm sao cho tối thiểu áp suất mất mát qua các lỗ bắn mở vỉa và thời gian bơm phải tối ưu để lợi ích kinh tế sau khi thực hiện nứt vỉa thủy lực là cao nhất. Nồng độ hạt chèn phải đảm bảo hạt chèn đi qua lỗ bắn mở vỉa và không bị hiện tượng bít nhét, chất đóng tại lỗ bắn mở vỉa, hạt chèn chất đóng bên trong ống khai thác và giảm thiểu hiện tượng hạt chèn chất đóng bên trong khe nứt.

- Tiếp tục nghiên cứu các thông số khác không điều chỉnh được như tính chất của đất đá tầng cát kết Oligocene chặt sét tới dẫn suất của khe nứt.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Dầu khí Việt Nam trong khuôn khổ đề tài mã số GV1708

Tài liệu tham khảo

1. Viện Dầu khí Việt Nam. *Tuyển tập Báo cáo Hội nghị Khoa học - Công nghệ "Trí tuệ Dầu khí Việt Nam: Hội nhập và phát triển bền vững"*. Nhà xuất bản Khoa học và Kỹ thuật. 2013.
2. BJ. *Hydraulic fracturing post job report for wells*. 2010.
3. BJ-PVDrilling JV Company Ltd. *Fracturing report summary*. 2011.

4. M.King Hubbert, David G.Willis. *Mechanics of hydraulic fracturing*. Society of Petroleum Engineers. 1957; 210: p. 153 - 168.
5. W.R.Matthews, J.Kelly. *How to predict formation pressure and fracture gradient from electric and sonic logs*. Oil and Gas Journal. 1967.
6. E.S.Pennebaker. *An engineering interpretation of seismic data*. Fall Meeting of the Society of Petroleum Engineers of AIME. 29 September - 2 October, 1968.
7. Ben A.Eaton. *Fracture gradient prediction and its application in oil field operations*. Journal of Petroleum Technology. 1969; 21(10): p. 1353 - 1360.
8. Stan A.Christman. *Offshore fracture gradients*. Journal of Petroleum Technology. 1973; 25(8): p. 910 - 914.
9. L.A.MacPherson, L.N.Berry. *Prediction of fracture gradients*. Log Analyst. 1972.
10. J.A.Cornell. *How to apply response surface methodology (2nd edition)*. American Society for Quality Control, Milwaukee, WI. 1990.
11. Douglas C.Montgomery. *Design and analysis of experiments (5th edition)*. John Wiley and Sons, New York. 2001.
12. Raymond H.Myers, Douglas C.Montgomery. *Response surface methodology: Process and product optimization using designed experiments (2nd edition)*. John Wiley and Sons, New York . 2002.
13. Raymond H.Myers, Douglas C.Montgomery, Christine Anderson-Cook. *Response surface methodology: Process and product optimization using designed experiments (3rd edition)*. John Wiley and Sons, New York. 2009.
14. T.K.Perkins, L.R.Kern. *Width of hydraulic fractures*. Journal of Petroleum Technology. 1961; 13(9): p. 937 - 949.
15. George E.P.Box, Norman Richard Draper. *Empirical modelbuilding and response surfaces*. Wiley, New York. 1987.
16. G.E.P Box, J.S.Hunter. *Multi-factor experimental designs for exploring response surfaces*. The Annals Mathematical Statistics. 1957; 28(1): p. 195 - 241.
17. George J.Klir, Ute St.Clair, Bo Yuan. *Fuzzy set theory: Foundations and applications*. Prentice Hall, New Jersey, USA. 1997.
18. Hans-Jürgen Zimmermann. *Fuzzy set theory and its applications (2nd edition)*. Springer. 1991.
19. Ramandeep S.Sidhu, Sunil Khullar, Parvinder S.Sandhu, R.P.S.Bedi, Kiranbir Kaur. *A subtractive clustering based approach for early prediction of fault proneness in software modules*. Engineering and Technology International Journal of Computer and Systems Engineering. 2010; 4(7).
20. Petrovietnam. *Fractured basement reservoir*. Science and Technics Publishing House. 2008.
21. B.B.Williams. *Fluid loss from hydraulically induced fractures*. Journal Petroleum Technology. 1970; 22(7).
22. Bert B.Williams, John L.Gidley, Robert S.Schechter. *Acidizing fundamentals*. Society of Petroleum Engineers. 1979.
23. M.B.Smith. *Hydraulic fracturing (2nd edition)*. NSI Technologies, Tulsa, Oklahoma. 1997.
24. Michael Richardson. *A new and practical method for fracture design and optimisation*. SPE/CERI Gas Technology Symposium, Calgary, Alberta, Canada. 3 - 5 April 2000.
25. K.G.Nolte. *Determination of proppant and fluid schedules from fracturing pressure decline*. SPE Production Engineering. 1986; 1(4): p. 255 - 265.
26. H.Z.Meng, K.E.Brown. *Coupling of production forecasting, fracture geometry requirements and treatment scheduling in the optimum hydraulic fracture design*. SPE 16435. SPE Low Permeability Reservoirs Symposium, Denver, Colorado. 18 - 19 May, 1987.
27. R.P.Nordgren. *Propagation of a vertical hydraulic fracture*. Society of Petroleum Engineers Journal. 1972; 12(4): p. 306 - 314.
28. Michael Economides, Ronald Oligney, Peter Valkó. *Unified fracture design*. Orsa Press. 2002.
29. George C.Howard, C.R.Fast. *Optimum fluid characteristics for fracture extension*. Drilling and Production Practice, New York. 1 January 1957.
30. M.M.Rahman, M.K.Rahman, S.S.Rahman. *Optimizing treatment parameters for enhanced hydrocarbon production by hydraulic fracturing*. Journal of Canadian Petroleum Technology. 2003; 42(6): p. 38 - 46.
31. Peter Valkó, Michael J.Economides. *Hydraulic fracture mechanics*. John Wiley & Sons, Chichester, England. 1995.
32. B.R.Meyer, R.H.Jacot. *Impact of stress-dependent*

Young's moduli on hydraulic fracture modeling. The 38th U.S. Symposium on Rock Mechanics, Washington, DC . 7 - 10 July, 2001.

treatments in the fruitland coal and pictured cliffs formations in the San Juan basin. SPE Eastern Regional Meeting, Lexington, Kentucky. 23 - 26 October, 2002 .

33. Lucas W.Bazan, Sam D.Larkin, R.Henry Jacot, Bruce R.Meyer. *Modeling of simultaneous proppant fracture*

THE EFFECT OF OPERATING FRACTURING PARAMETERS ON FRACTURE CONDUCTIVITY AND PROPPANT MASS REQUIREMENT FOR TIGHT OLIGOCENE RESERVOIR

Nguyen Huu Truong¹, Nguyen Quoc Dung², Pham Dinh Phi³, Nguyen Viet Khoi Nguyen¹

¹Petrovietnam University

²Vietsoyepetro

³Baker-Hughes

Email: truongnh@pvu.edu.vn

Summary

The authors used the experimental central composite design (CCD) and optimum response surface methodology (RSM) to investigate the effect of four operating fracturing parameters on fracture conductivity during hydraulic injection in the Oligocene reservoir. By using the RSM method, the maximised fracture conductivity has been determined according to four optimum factors including leak-off coefficient, proppant concentration, injection time, and injection rate. The correlation between the responses of fracture conductivity and four parameters has been presented in the research with the confident coefficient factor of R square of 0.995 and R square adjust of 0.990. The results showed that the maximum fracture conductivity was 1,300md.ft with optimal leak-off coefficient of 0.0031ft/min^{0.5}, injection rate of 40bpm, injection time of 96 minutes, and proppant concentration of 10ppg.

Key words: Optimum response surface methodology (RSPM), operating fracturing parameters, experimental central composite design (CCD), Oligocene.