

## ỨNG DỤNG PHƯƠNG PHÁP PHÂN TÍCH ĐIỂM NÚT ĐỂ TỐI ƯU ĐƯỜNG KÍNH ỐNG KHAI THÁC

Nguyễn Kiên Cường, Lê Phước Hảo, Trịnh Hữu Tuấn, Đỗ Quang Khánh

Khoa Địa chất và Dầu khí, Trường Đại học Bách Khoa – ĐHQG-HCM

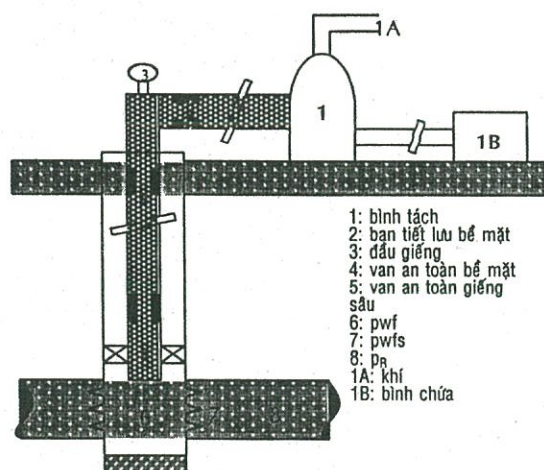
(Bài nhận ngày 04 tháng 08 năm 2003)

**TÓM TẮT:** Phương pháp phân tích điểm nút là một phương pháp linh hoạt và đơn giản được xây dựng và phát triển từ các phương trình cơ học chất lưu dùng để giải các bài toán tối ưu hóa, cũng như thiết kế các thông số thích hợp cho các hệ thống sản xuất công nghiệp liên quan. Trong khi các phương pháp khác chỉ được dùng để phân tích từng bộ phận rời rạc trong hệ thống thì phương pháp phân tích điểm nút cho phép ứng dụng để phân tích toàn bộ hệ thống.

Trong lĩnh vực công nghiệp dầu khí, phương pháp phân tích điểm nút được ứng dụng nhằm cải tiến hiệu suất của hệ thống khai thác, tối ưu các thông số khai thác như thông số ống khai thác, thông số lưu lượng, thông số áp suất, thông số hoàn thiện giếng... Để có thể tối ưu hệ thống khai thác, cần tối ưu tất cả các thông số khai thác có thể. Báo cáo này chỉ đề cập việc ứng dụng phương pháp phân tích điểm nút để tính toán đường kính ống khai thác tối ưu.

### 1. CƠ SỞ LÝ THUYẾT

Phương pháp phân tích điểm nút (NODAL Analysis) thường được ứng dụng trong việc phân tích đặc tính của hệ thống gồm nhiều bộ phận tương tác lẫn nhau. Hệ thống mạch điện, mạng lưới đường ống hay bơm ly tâm, tất cả đều có thể được phân tích theo phương pháp này. Phương pháp phân tích điểm nút được Gilbert ứng dụng cho giếng khoan-khai thác dầu khí lần đầu tiên vào năm 1954 và sau đó được Nind (1964) và Brown (1978) phát triển.



Hình 1. Vị trí của các nút trong hệ thống khai thác

Nội dung của phương pháp là chọn lựa một điểm nút trong hệ thống khai thác và phân tích hệ thống tại nút này. Vị trí các nút trong hệ thống khai thác được thể hiện ở hình 1. Đầu



vào của nút gồm các bộ phận từ vỉa sản phẩm đến nút còn đầu ra của nút gồm các bộ phận từ nút đến bình tách. Mối liên hệ giữa lưu lượng và áp suất trong từng bộ phận của hệ thống khai thác hoàn toàn xác định. Lưu lượng chất lưu đi qua hệ thống chỉ có thể được xác định khi thỏa mãn các yêu cầu sau:

1. Tại một nút xác định, lưu lượng vào phải bằng lưu lượng ra.
2. Tại một nút xác định, chỉ tồn tại một giá trị áp suất.

Tuy nhiên cần lưu ý rằng trong thời gian khai thác, luôn tồn tại hai giá trị áp suất độc lập đối với lưu lượng khai thác: đó là áp suất trung bình của vỉa và áp suất đầu ra của giếng. Áp suất đầu ra thường là áp suất bình tách ( $p_{sep}$ ), ở thiết bị đầu giếng nếu có van tiết lưu bề mặt thì áp suất đầu ra là áp suất đầu giếng ( $p_{wh}$ ).

Tại một nút bất kỳ trong hệ thống khai thác có van tiết lưu bề mặt phương trình dòng vào và dòng ra nút được biểu diễn như sau:

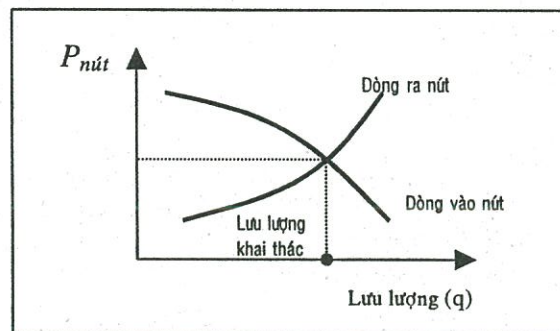
$$- \text{Dòng vào nút: } p_R - \Delta p \text{ (các bộ phận trước nút)} = p_{nút} \quad (1)$$

$$- \text{Dòng ra nút: } p_{wh} + \Delta p \text{ (các bộ phận sau nút)} = p_{nút} \quad (2)$$

với  $p_R$  và  $p_{wh}$  lần lượt là áp suất vỉa và áp suất đầu giếng,  $p_{sia}$ .

Độ giảm áp  $\Delta p$  tại bộ phận bất kỳ thay đổi theo lưu lượng  $q$ . Do đó, quan hệ giữa  $\Delta p$  và  $q$  tại một nút được biểu diễn bởi hai đường trên hình 2, giao điểm hai đường cong này thỏa mãn phương trình (1) và (2).

Ảnh hưởng do thay đổi tính chất của bất kỳ một bộ phận nào cũng đều có thể được phân tích bằng cách tính toán lại tương quan giữa lưu lượng với áp suất điểm nút dựa vào các đặc tính mới nơi bộ phận thay đổi. Nếu sự thay đổi chỉ xảy ra ở dòng vào, đường đặc tính dòng ra sẽ không thay đổi. Tuy nhiên, nếu bất kỳ đường cong nào thay đổi, thì điểm làm việc sẽ dịch chuyển và tại nút đang xét lưu lượng và áp suất làm việc mới sẽ được thiết lập. Các đường cong cũng có thể thay đổi nếu cả hai giá trị áp suất độc lập (áp suất vỉa và áp suất đầu giếng) thay đổi, trong trường hợp kích thích vỉa hay thay đổi vào điều kiện làm việc của đầu giếng.



Hình 2. Đồ thị quan hệ giữa  $\Delta p$  và  $q$

Khi xét bài toán tính toán đường kính ống khai thác tối ưu, ta cần phải chọn điểm nút ở đáy giếng (nút số 6). Sau đó tìm phương trình dòng vào nút, dòng ra nút. Giao điểm của các đường đặc tính này giúp xác định các thông số cần thiết để giải bài toán tối ưu hóa. Hàm mục tiêu ở đây là lưu lượng khai thác ứng với các giá trị tổn thất áp suất. Đường kính ống khai thác được xem là tối ưu khi lưu lượng khai thác tối đa.



## 2. Ứng dụng phương pháp phân tích điểm nút để tính toán đường kính ống khai thác tối ưu

### 2.1 Các bước thực hiện

Trong bài toán này điểm nút được chọn ở đáy giếng. Nút áp suất cho dòng vào và dòng ra là  $p_{wf}$ . Khi đó các phương trình dòng vào và dòng ra lần lượt là:

- Dòng vào:  $p_R - \Delta p_{via} = p_{wf}$
- Dòng ra:  $p_{wh} + \Delta p_{\text{ống khai thác}} = p_{wf}$

trong đó:

$p_{wf}$ : áp suất dòng vào đáy giếng, psia

$\Delta p_{\text{ống khai thác}}$ : tổn áp trong ống khai thác, psia

$\Delta p_{via}$ : tổn áp trong vỉa.

Dòng vào thường được xác định từ phương trình:

$$q_L = J(p_R - p_b) + \frac{Jp_b}{1,8} \left[ 1,8 \left( 1 - \frac{p_{wf}}{p_b} \right) - 0,8(FE) \left( 1 - \frac{p_{wf}}{p_b} \right)^2 \right]$$

trong đó:

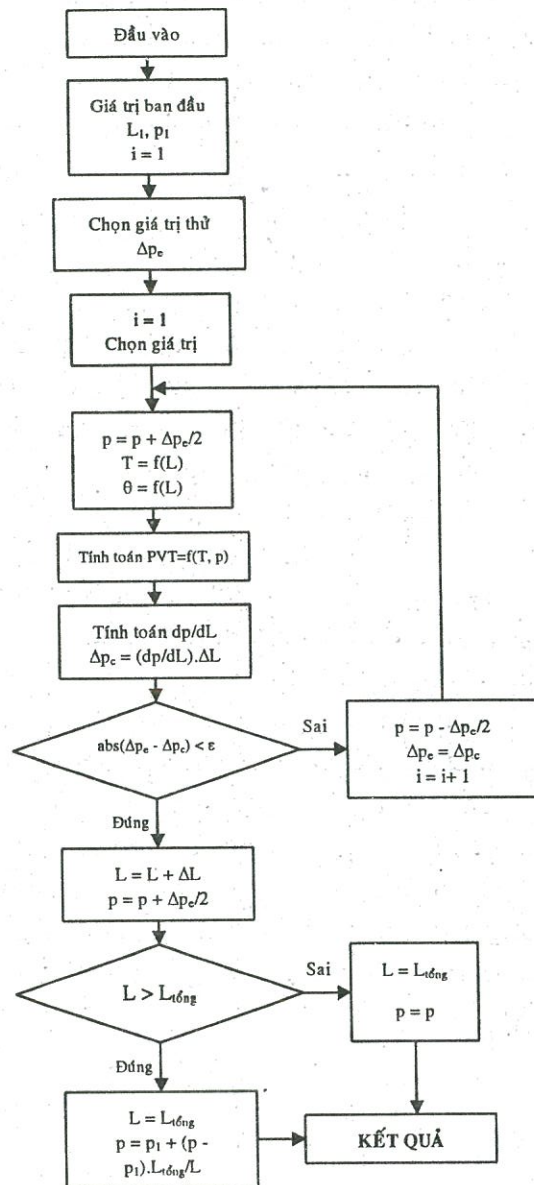
J: chỉ số khai thác

$p_b$ : áp suất điểm bọt khí, psia

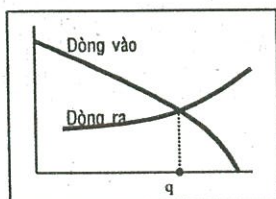
FE: hệ số hiệu suất dòng chảy.

Dòng ra là dòng chảy trong ống khai thác, thuật toán xác định dòng ra được biểu diễn ở hình 3. Trong thực tế người ta tính tổn thất áp suất trong ống khai thác bằng cách tra các bảng phụ lục đính kèm theo ống khai thác do nhà sản xuất cung cấp hoặc sử dụng các phần mềm ứng dụng như Wellflow, Perform 3.00...

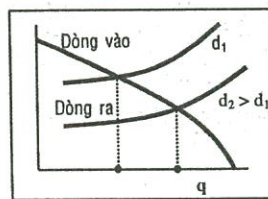
Giao điểm của hai đường dòng vào và dòng ra là lưu lượng khai thác (hình 4). Ứng với các giá trị đường kính ống khai thác khác nhau ta thu được các giá trị lưu lượng khai thác khác nhau (hình 5). Khi tăng đường kính ống khai thác thông thường lưu lượng khai thác tăng theo. Tuy nhiên, khi đường kính ống khai thác vượt quá một giá trị nào đó thì lưu lượng khai thác bắt đầu giảm, do khi đó năng lượng trọng lực của cột lưu chất trong ống tăng khiến năng lượng vỉa không đủ đáp ứng cho việc nâng lưu chất. Đường kính ống khai thác tối ưu là đường kính ứng với trường hợp lưu lượng khai thác tối đa (hình 6).



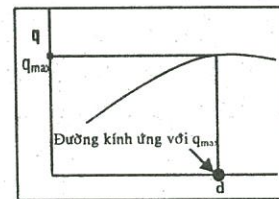
Hình 3. Sơ đồ thuật toán tính toán dòng chảy trong ống khai thác



Hình 4. Đồ thị liên hệ lưu lượng q và  $p_{wf}$



Hình 5. Lưu lượng khai thác ứng với các giá trị đường kính ống khai thác



Hình 6. Đường kính ống khai thác tối ưu



**2.2. Áp dụng số**

Sau đây, chúng ta tiến hành tính toán cho một cấu trúc giếng cụ thể ở hình 7. Các dữ liệu khảo sát ban đầu như sau:

Phân tích DST

$FE = 1,3$

$p_R = 4500$  psia

$T_{res} = 300$  °F

$p_{test} = 3000$  psia

$q_{test} = 2000$  STB/ngày

$p_{wh} = 400$  psia

$p_b = 2500$  psia

Cấu trúc giếng khoan:

Phân tích PVT

$GLR = 1000$  scf/STB

$API = 35$

$f_w = 0,001$

$\gamma_w = 1,07$

$\gamma_g = 0,65$

Hoàn thiện giếng:

Chiều dày vỉa  $h = 30$  ft

Đường kính giếng  $d_w = 8,921$  in

Đường kính lỗ bắn  $d_p = 0,5$  in

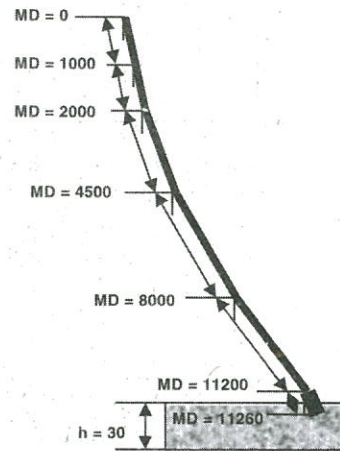
Độ thấm của sỏi lèn  $k_G = 45000$  md

Số lỗ bắn vỉa  $N = 12$  lỗ/foot

**Bảng 1. Dữ liệu cấu trúc giếng khoan**

Chiều sâu, ft	từ	0	1000	2000	4500	8000	11200
	đến	1000	2000	4500	8000	11200	11260
Góc nghiêng, độ		5	5	10	15	20	5
Đường kính ống khai thác, in	A	1,995	1,995	1,995	1,995	1,995	$d_c$
	B	2,441	2,441	2,441	2,441	2,441	$d_c$
	C	2,992	2,992	2,992	2,992	2,992	$d_c$
	D	3,958	3,958	3,958	3,958	3,958	$d_c$
	E	5,012	5,012	5,012	5,012	5,012	$d_c$
Độ nhám thành ống, ft		0,0006	0,0006	0,0006	0,0006	0,0006	0,0006

$d_c = 7,025$  in: đường kính ống chống khai thác



**Hình 7. Cấu trúc giếng khoan**

Từ các dữ liệu trên chúng ta có thể xác định được lưu lượng khai thác ứng với các trường hợp ống khai thác A, B, C, D, E (bảng 1). Các thông số dòng vào và dòng ra có thể được tính bằng các phần mềm thương mại như Perform 3.00, Wellflow... Ở đây, kết quả tính toán ở bảng 2 và 3 được thực hiện bằng chương trình tối ưu hóa đường kính ống khai thác gọi tắt là Tubopt (viết bằng ngôn ngữ Matlab) và Perform 3.00.

**Bảng 2. Kết quả thông số dòng vào và dòng ra tính bằng chương trình Tubopt**

Lưu lượng ( $q_L$ , STB/D)	200	600	1000	1400	1800	2200	2600	3000	
Dòng vào ( $p_{wf}$ , psia)	4245	3879	3492	3082	2650	2196	1719	1221	
Dòng ra ( $p_{wf}$ , psia)	A	2063	2142	2520	3076	3680	4301		
	B		2001	2104	2306	2572	2905	3262	3615
	C			1969	2012	2098	2216	2369	2534
	D			1981	1940	1926	1929	1948	1977
	E					1950	1922	1904	1892

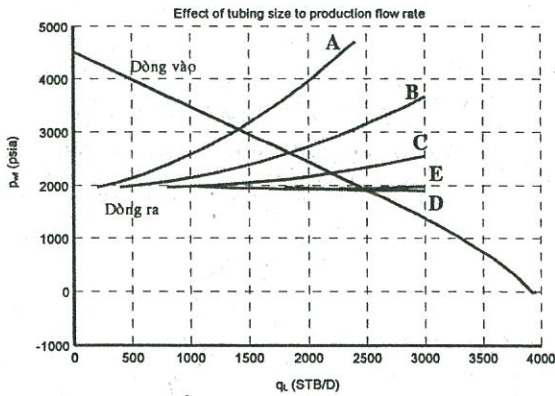
Lưu ý: ta có thể tính được các giá trị trong các ô bỏ trống ở bảng 2. Tuy nhiên, do các giá trị này không ảnh hưởng đến kết quả nên ta không cần tính nhằm giúp chương trình Tubopt chạy nhanh hơn.

**Bảng 3. Kết quả thông số dòng vào và dòng ra tính bằng chương trình Perform 3.00**

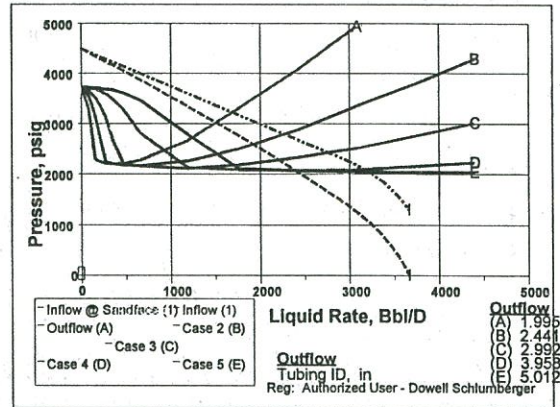
Lưu lượng ( $q_L$ , STB/D)	13	113	208	351	659	1758	3076	4394	
Dòng vào ( $p_{wf}$ , psia)	4488	4394	4305	4170	3875	2792	1269		
Dòng ra ( $p_{wf}$ , psia)	A	3671	2902	2255	2208	2285	3311	4941	
	B	3701	3410	2715	2213	2171	2508	3364	4297
	C	3726	3617	3371	2665	2162	2185	2522	3020
	D	3728	3700	3655	3490	2809	2092	2096	2239
	E	3728	3724	3708	3677	3472	2121	2053	2048



Từ số liệu tính được ở bảng 2 và 3, ta vẽ được đồ thị giao điểm của dòng vào và các đường dòng ra ứng với các trường hợp đường kính ống khai thác thay đổi từ 1,995 (in) đến 5,012 (in) (hình 8 và 9).



Hình 8. Đồ thị xác định lưu lượng khai thác ứng với các cấp đường kính ống khai thác (tính bằng Tubopt)



Hình 9. Đồ thị xác định lưu lượng khai thác ứng với các cấp đường kính ống khai thác (tính bằng Perform 3.00)

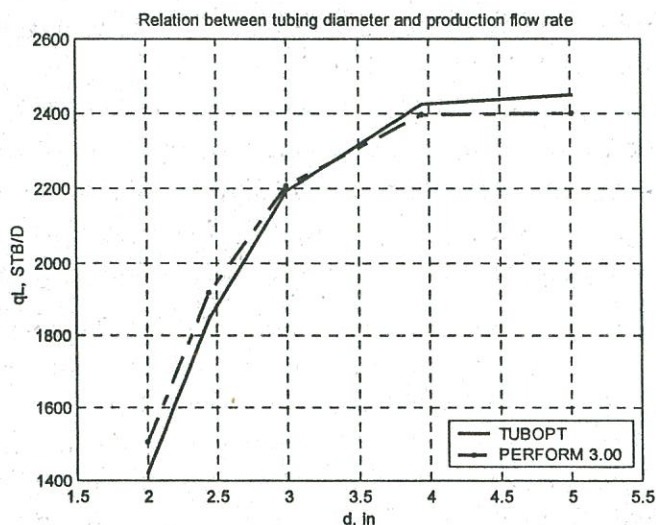
Kết quả các giá trị lưu lượng khai thác ứng với các cấp đường kính ống khai thác khác nhau tính được thể hiện ở bảng 4, hình 10.

Bảng 4. Kết quả thông số dòng vào và dòng ra

d, in		1,995	2,441	2,992	3,958	5,012
$p_{wf}$ , psia	TUBOPT	3065	2602	2211	1935	1910
	PERFORM 3.00	3017	2585	2275	2064	2063
	Sai số, %	1,57	0,65	2,81	6,25	7,42
$q_L$ , STB/ngày	TUBOPT	1421	1848	2192	2425	2447
	PERFORM 3.00	1506	1919	2206	2397	2398
	Sai số, %	5,64	3,7	0,63	1,15	2

Như vậy, cả hai chương trình Tubopt và Perform 3.00 cho kết quả lưu lượng khai thác tối đa lần lượt là 2447 (STB/ngày) và 2398 (sai số 2 %) ứng với đường kính ống khai thác  $d=5,012$  (in). Nếu xem xét kết quả đơn thuần về mặt toán học, ta có thể kết luận ngay cấp đường kính ống khai thác tối ưu là 5,012 (in). Tuy nhiên, nếu xem xét kỹ thì ta nhận thấy rằng lưu lượng khai thác ứng với cấp đường kính 5,012 (in) tăng không đáng kể so với cấp đường kính 3,958 (0,9 % trong chương trình Tubopt và 0,04 % trong chương trình Perform 3.00) trong khi giảm cấp đường kính từ 5,012 xuống còn 3,958 ta sẽ giảm được chi phí mua ống khai thác và cả chi phí khoan (ống khai thác càng lớn đòi hỏi lỗ khoan càng lớn và càng tốn chi phí). Vì thế, nếu xét bài toán một cách tổng thể thì cấp đường kính ống khai thác 3,958 là tối ưu nhất. Kết quả tìm được tuân theo đúng nguyên tắc đã trình bày ban đầu là khi đường kính ống khai thác tăng thì lưu lượng khai thác tăng, nhưng sau đó lưu lượng khai thác sẽ tăng không đáng kể và bắt đầu giảm khi tiếp tục tăng đường kính ống khai thác.





Hình 10. Quan hệ giữa đường kính ống khai thác và lưu lượng khai thác

### 3. KẾT LUẬN

Phương pháp phân tích điểm nút ứng dụng trong bài toán này không những cho phép xác định lưu lượng khai thác ứng với các cấp đường kính ống khai thác khác nhau mà còn cho phép xác định cấp đường kính cho lưu lượng khai thác tối đa. Về mặt toán học, ta có thể kết luận ngay cấp đường kính này là tối ưu. Tuy nhiên, nếu xem xét vấn đề ở cả khía cạnh kỹ thuật lẫn kinh tế thì ta nhận thấy rằng cần phải chú ý đến những giá trị đường kính lân cận. Điều này cho thấy chương trình trình máy tính không thể cho kết quả tổng thể tốt nhất mà kết quả tốt nhất = phần mềm hỗ trợ + kinh nghiệm người kỹ sư thiết kế.

Tóm lại, phương pháp phân tích điểm nút là một phương pháp hiệu quả trong việc xác định đường kính ống khai thác tối ưu. Bằng cách chọn điểm nút ở các vị trí thích hợp trong hệ thống, chúng ta không chỉ có thể tính toán tối ưu các thông số khác trong hệ thống mà còn có thể xác định hiệu quả khai thác của mọi bộ phận trong hệ thống. Ngoài ra, phương pháp phân tích điểm nút còn có thể được mở rộng để tính toán hiệu quả khai thác của vỉa có nhiều tầng sản phẩm hoặc vỉa gồm nhiều giếng khai thác và áp dụng trong việc dự đoán hiện trạng của giếng, của vỉa ở thời điểm tương lai để từ đó giúp người kỹ sư đề xuất các biện pháp khai thác thích hợp.

## APPLYING NODAL ANALYSIS APPROACH FOR OPTIMIZATION OF TUBING DIAMETER

Nguyen Kien Cuong, Le Phuoc Hao, Trinh Huu Tuan, Do Quang Khanh  
Faculty of Geology and Petroleum, University of Technology – VNU-HCM

**ABSTRACT:** The Nodal analysis approach is a very flexible and simple method. It is set up and developed from the fluid mechanics equations using to solve optimal problems and design suitable parameters to related industry production systems. Once procedures are

presented to analyze each component separately, the Nodal Analysis approach will be applied to analyze all system.

In petroleum industry, the Nodal Analysis approach can be used to improve performance of production systems, optimize production parameters such as tubing size, flow rate, pressure, well completed parameters...To be able to optimize production system, we must optimize all possible production parameters. However, this paper only performs applying the Nodal Analysis approach to calculate optimum tubing diameter.

### TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Curtis H. Whitson. *Well Performance*, Prentice Hall, New Jersey (1991).
- [2] Carroll, J. A and Horne, R. N. *Multivariate Optimization of Production Systems*, JPT (7/1992), pp. 782 – 789.
- [3] H. Dale Beggs. *Production Optimization Using NODAL<sup>TM</sup> Analysis*, OGCI Publication (1991).
- [4] H. Dale Beggs and Brill. *Two - Phase Flow in Pipes*, Third Edition (1984).
- [5] PSG/IHS Energy Group. *Well PERFORMANCE Analysis<sup>TM</sup>, Version 3.00*, Richardson, TX 75081 USA (26/7/1999).
- [6] Royal Eugene Collins. *Flow of Fluids through Porous Materials*, Reinhold Publishing Coporation, NewYork (1987).
- [7] Society of Petroleum Engineers. *Well Completions*, Dallas Texas (1980).
- [8] TS. Lê Phước Hảo, KS. Phạm Anh Tuấn, KS. Lê Đình Lăng. *Tính chất cơ lý của đá chứa dầu*, Báo cáo nghiệm thu đề tài NCKH cấp bộ (2001).
- [9] Ueda, Samizo and Shirakawa. *Application of Production System Optimization to an Offshore Field*, SPE 21419 (11/1991), pp. 699 -714.