

Đánh giá hiệu quả công nghệ Downhole Vibration - RatPACK™ trong xử lý sự cố kẹt các giếng khoan dầu khí có độ nghiêng lớn

Nguyễn Văn Thành*, Tô Hữu Toàn, Nguyễn Khắc Long, Doãn Thị Trâm, Lê Quang Duyến,
Lê Văn Nam
Trường Đại học Mỏ - Địa chất

TÓM TẮT

Sự cố kẹt là nguyên nhân chính gây thời gian phi sản xuất trong các giếng khoan định hướng và giếng ngang do lực ma sát lớn giữa cột cần khoan và thành giếng. Các phương pháp xử lý truyền thống như kéo thẳng (overpull) hoặc tạo va đập thủy lực (hydraulic jarring) thường có hiệu quả hạn chế do suy hao năng lượng dọc cột cần khoan. Nghiên cứu này đánh giá hiệu quả của công nghệ dao động thủy lực Downhole Vibration - RatPACK™ trong xử lý sự cố kẹt tại các giếng có độ nghiêng lớn thông qua phân tích lý thuyết, mô hình động lực học và dữ liệu hiện trường. Cơ chế giảm ma sát của RatPACK™ được phân tích dựa trên dao động dọc trục và sự suy giảm lực pháp tuyến hiệu dụng giữa cột cần khoan và thành giếng. Kết quả cho thấy dao động dọc trục giúp chuyển trạng thái ma sát từ ma sát tĩnh sang ma sát động, qua đó làm giảm đáng kể lực ma sát trung bình và cải thiện khả năng truyền tải tải trọng trong giếng nghiêng. Trong trường hợp nghiên cứu điển hình, tải kéo cần thiết để giải phóng ống khai thác/packer giảm từ khoảng 175.000 lbf (~778 kN) xuống còn khoảng 22.000 lbf (~98 kN), tương ứng mức giảm gần 87%; thời gian xử lý sự cố giảm xuống khoảng 8 phút sau khi kích hoạt công cụ. Hiệu quả vận hành tối ưu đạt được trong dải tần dao động 12-18 Hz. Kết quả nghiên cứu cho thấy RatPACK™ là giải pháp hiệu quả cho các sự cố kẹt do ma sát trong giếng định hướng và giếng ngang, góp phần giảm thời gian phi sản xuất và nâng cao hiệu quả công tác cứu kẹt và sửa chữa giếng.

Từ khóa: Kẹt thiết bị, Dao động dọc trục, RatPACK™, Giếng khoan định hướng, Công tác cứu kẹt.

1. Đặt vấn đề

Sự cố kẹt là một trong những nguyên nhân chính làm gia tăng chi phí và rủi ro trong hoạt động khoan dầu khí. Theo Aadnoy và Cooper (2010), chi phí xử lý sự cố kẹt có thể chiếm tới 15-25% tổng chi phí khoan. Vấn đề này trở nên nghiêm trọng hơn trong các giếng có độ lệch lớn và giếng ngang, nơi lực ma sát giữa cột cần khoan và thành giếng tăng đáng kể do thành phần lực pháp tuyến gia tăng theo góc nghiêng (Mitchell và Miska, 2011).

Trong các điều kiện này, hiệu quả truyền tải lực từ bề mặt xuống đáy giếng bị suy giảm rõ rệt, làm cho các phương pháp truyền thống như kéo thẳng (overpull) và tạo va đập thủy lực (hydraulic jarring) trở nên kém hiệu quả và tiềm ẩn nguy cơ hư hỏng thiết bị. Ngoài ra, sự tích tụ của mùn khoan và mảnh vụn cơ học còn làm gia tăng khả năng hình thành các cầu vật liệu, dẫn đến kẹt cơ học (Zhang và nnk., 2021).

Theo Aadnoy và Cooper, kẹt là một trong những nguyên nhân chính gây thời gian phi sản xuất trong các giếng khoan định hướng. Các báo cáo hiện trường gần đây của American Oil and Gas Reporter (2023) cho thấy công nghệ cứu kẹt nguyên lý rung có xu hướng được áp dụng ngày càng nhiều trong các giếng khoan vươn xa tại Bắc Mỹ (Aadnoy và Cooper, 2010).

Các nghiên cứu động lực học cột cần khoan cho thấy dao động dọc trục có thể làm giảm lực ma sát hiệu dụng và cải thiện khả năng truyền năng lượng trong hệ thống (Ghasemloonia và nnk., 2014). Đồng thời, dao động còn có khả năng phá vỡ cấu trúc vật liệu tích tụ trong giếng, góp phần giảm lực cản cơ học (Saadeldin và nnk., 2023). Trên cơ sở đó, công nghệ Downhole Vibration được phát triển như một giải pháp thay thế hiệu quả cho các phương pháp truyền thống.

2. Tổng quan công nghệ Downhole Vibration - RatPACK™

2.1. Cơ sở phát triển công nghệ Downhole Vibration - RatPACK™

* Tác giả liên hệ

Email: nguyenvanthanh@hmg.edu.vn

Trong các giếng khoan có độ lệch lớn và giếng ngang, lực ma sát giữa cột cần khoan và thành giếng tăng mạnh do thành phần lực pháp tuyến tỷ lệ với góc nghiêng, làm suy giảm đáng kể hiệu quả truyền tải tải trọng và năng lượng từ bề mặt xuống đáy giếng (Mitchell và Miska, 2011). Trong điều kiện này, các phương pháp xử lý truyền thống như kéo thẳng (overpull) hoặc tạo va đập thủy lực (hydraulic jarring) thường không đạt hiệu quả do tổn thất năng lượng dọc theo cột cần khoan và nguy cơ làm gia tăng trạng thái kẹt cơ học.

Các nghiên cứu về động lực học cột cần khoan đã chỉ ra rằng dao động dọc trục có thể làm giảm lực ma sát hiệu dụng thông qua việc phá vỡ trạng thái tiếp xúc liên tục giữa các bề mặt, từ đó cải thiện khả năng truyền năng lượng trong hệ thống (Ghasemloonia và nnk., 2014). Đồng thời, dao động còn có khả năng làm suy yếu cấu trúc của các vật liệu tích tụ trong giếng như mùn khoan, cặn và mảnh vụn cơ học, góp phần giảm lực cản cơ học (Saadeldin và nnk., 2023). Trên cơ sở đó, công nghệ Downhole Vibration đã được phát triển như một giải pháp kỹ thuật nhằm khai thác các hiệu ứng dao động để hỗ trợ xử lý sự cố kẹt thiết bị.

Trong các giếng khoan có độ lệch lớn và giếng ngang, sự gia tăng lực ma sát giữa cột cần khoan và thành giếng dẫn đến suy giảm hiệu quả truyền tải tải trọng và năng lượng từ bề mặt xuống đáy giếng. Đây là nguyên nhân chính làm gia tăng nguy cơ kẹt cần, đặc biệt trong các điều kiện có mùn khoan, mảnh vụn cơ học và cặn tích tụ (Mitchell và Miska, 2011; Zhang và nnk., 2021).

Theo thống kê của SPE và các báo cáo kỹ thuật hiện trường, kẹt cần chiếm khoảng 20-25% tổng thời gian phi sản xuất (NPT) trong hoạt động khoan định hướng và khoan vươn xa (Aadnoy và Cooper, 2010). Trong nhiều trường hợp, các phương pháp truyền thống như kéo thẳng hoặc va đập thủy lực/cơ học không thể truyền đủ năng lượng đến điểm kẹt do suy hao năng lượng dọc cột cần khoan. Bảng 1 thể hiện một số công nghệ xử lý sự cố kẹt và đặc điểm, ứng dụng.

Để đánh giá hiệu quả của công nghệ dao động dọc trục trong điều kiện thực tế, bài báo sử dụng dữ liệu hiện trường được tổng hợp từ công tác cứu kẹt và sửa chữa giếng sử dụng RatPACK™ của Baker Hughes (1999), kết hợp với các báo cáo kỹ thuật trong giếng nghiêng tại Bắc Mỹ và Trung Quốc.

Bảng 1. Phân loại một số công nghệ trong xử lý sự cố kẹt khi khoan giếng.

Công nghệ	Nguyên lý hoạt động	Thông số đặc trưng	Ưu điểm	Hạn chế	Ứng dụng điển hình
Rung thủy lực RatPACK™	Tạo dao động dọc trục bằng chênh áp dòng dung dịch qua van dao động tuần hoàn	- Tần số: 12-18 Hz - Lưu lượng: 1-3 bpm - Áp suất vận hành: 1000-1500 psi - Tải kéo tối đa: ~425,000 lbf (~1890 kN)	- Giảm mạnh ma sát dọc trục - Hiệu quả cao trong giếng nghiêng và giếng ngang - Hỗ trợ giải phóng kẹt cần và packer	- Phụ thuộc lưu lượng bơm - Hiệu quả giảm trong kẹt xi măng cứng	- Kẹt cần - Kẹt packer - Kẹt ống trong giếng nghiêng
Dao động thủy lực (HOT)	Dao động tuần hoàn bằng piston thủy lực kết hợp lò xo đàn hồi	- Tần số thấp -trung bình - Áp suất vận hành trung bình - Biên độ dao động lớn	- Tăng hiệu quả truyền tải lực - Giảm lực kéo trong hoàn thiện giếng	- Cấu tạo phức tạp hơn - Bảo trì khó	- Thả ống lừng - Hoàn thiện giếng - Giếng khoan vươn xa
Dao động dọc trục (AOT)	Dao động dọc trục liên tục nhờ dòng chảy qua buồng tiết lưu	- Dao động liên tục - Hoạt động ổn định khi lưu lượng cao	- Giảm lực ma sát hiệu quả - Hỗ trợ truyền tải trọng đáy	- Hiệu quả phụ thuộc chương trình thủy lực giếng	- Khoan định hướng - Khoan ngang
Dao động cơ học	Tạo rung bằng cơ cấu lệch tâm cơ khí	- Tần số cao - Biên độ nhỏ	- Không phụ thuộc nhiều vào thủy lực	- Mài mòn cơ khí lớn - Khả năng truyền rung hạn chế	- Giếng nông - Cứu kẹt nhẹ
Kết hợp dao động và đập va đập tạo rung thủy lực	Tạo dao động và đập kết hợp với dao động rung	- Tạo đồng thời rung động và va đập	- Hiệu quả cao trong kẹt cần phức tạp	- Tải động lớn - Nguy cơ phá hủy do môi	- Kẹt cần nghiêm trọng - Cứu kẹt phức tạp quy mô lớn

2.2. Nguyên lý hoạt động

RatPACK™ là công cụ dao động dọc trục hoạt động dựa trên năng lượng thủy lực của dòng dung dịch. Khi dung dịch được bơm qua công cụ với lưu lượng xác định, sự biến thiên tuần hoàn của áp suất trong buồng công cụ kích hoạt cơ cấu van, tạo ra các xung dao động liên tục với tần số thấp, thường trong khoảng 12-18 Hz (Baker Hughes, 1999).

Về mặt cơ học, chuyển động dao động của công cụ có thể được mô tả bằng phương trình dao động điều hòa:

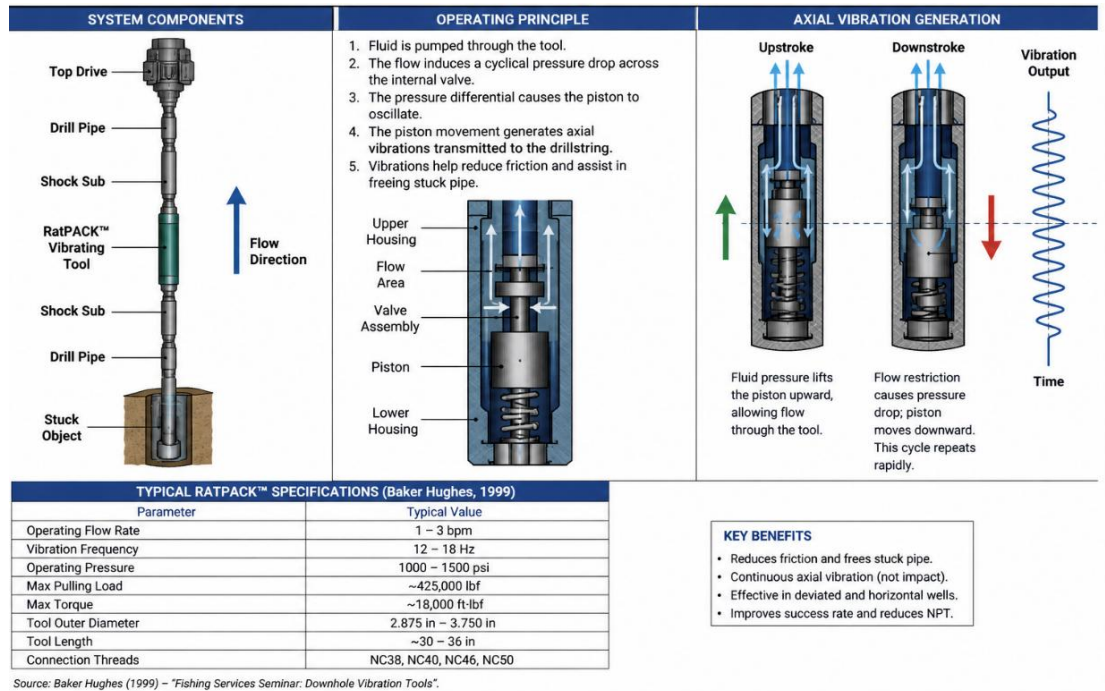
$$x(t) = A \sin(\omega t) \quad (1)$$

Trong đó: biên độ A và tần số góc ω phụ thuộc vào điều kiện thủy lực và đặc tính thiết kế của công cụ.

Dao động này tạo ra gia tốc biến thiên theo thời gian, dẫn đến lực quán tính tác động lên cột cần khoan, làm giảm lực pháp tuyến hiệu dụng giữa cột cần khoan và thành giếng. Kết quả là lực ma sát trung bình trong hệ giảm đáng kể, đặc biệt trong các giếng nghiêng (Mitchell và Miska, 2011).

Khác với cơ chế xung lực gián đoạn của va đập, dao động liên tục của RatPACK™ giúp duy trì trạng thái trượt vi mô tại bề mặt tiếp xúc, từ đó giảm hệ số ma sát hiệu dụng và hạn chế hiện tượng kẹt chặt hơn (Zhang và nnk., 2021).

Hình 1 minh họa cơ chế tạo dao động của công cụ, trong đó dòng dung dịch đóng vai trò cung cấp năng lượng để tạo dao động dọc trục, truyền trực tiếp đến vị trí thiết bị bị kẹt. Việc bố trí công cụ gần điểm kẹt giúp giảm tổn thất năng lượng do ma sát dọc cột cần khoan và nâng cao hiệu quả truyền dao động.



Hình 1. Nguyên lý cấu tạo và hoạt động của RatPACK™.

Hiệu quả của công nghệ RatPACK™ được hình thành từ sự kết hợp của nhiều cơ chế vật lý:

Thứ nhất, dao động dọc trục làm giảm ma sát thông qua việc chuyển trạng thái tiếp xúc từ ma sát tĩnh sang ma sát động. Theo các nghiên cứu về động lực học tiếp xúc, dao động có thể làm giảm đáng kể lực ma sát trung bình do giảm thời gian tiếp xúc hiệu dụng giữa các bề mặt (Ghasemloonia và nnk., 2014).

Thứ hai, dao động gây ra sự tái sắp xếp cấu trúc của các hạt vật liệu trong môi trường xung quanh thiết bị. Hiện tượng này đặc biệt quan trọng trong các trường hợp kẹt do cát hoặc mảnh vụn cơ học, khi dao động có thể làm giảm độ bền liên kết của khối vật liệu và tạo điều kiện cho thiết bị di chuyển (Saadeldin và nnk., 2023).

Thứ ba, dao động cải thiện hiệu quả truyền năng lượng trong cột cần khoan. Trong khi các phương pháp như va đập truyền năng lượng dưới dạng xung lực gián đoạn và dễ bị suy hao, RatPACK™ cung cấp năng lượng liên tục, giúp duy trì trạng thái kích thích tại điểm kẹt và nâng cao hiệu quả phá kẹt (Zhang và nnk., 2021).

Có thể thấy, so với các công cụ cơ khí truyền thống, RatPACK™ có ưu thế rõ rệt về: khả năng truyền dao động xa trong cột cần khoan; giảm nguy cơ hư hỏng do xung lực; hiệu quả cao trong giếng khoan vượn xa.

Ngoài ra, dao động liên tục còn giúp hạn chế hiện tượng kẹt-trượt và cải thiện hiệu quả truyền tải tải trọng xuống đáy giếng (Ghasemloonia và nnk., 2014).

Tuy nhiên, hiệu quả của RatPACK™ phụ thuộc đáng kể vào điều kiện thủy lực và vị trí bố trí công cụ trong bộ khoan cụ đáy. Trong các trường hợp kẹt cứng do xi măng hoặc ống chống bóp méo, dao động đơn thuần có thể không đủ để giải phóng thiết bị, khi đó cần kết hợp với búa thủy lực hoặc các giải pháp cứu kẹt khác (Zhang và nnk., 2021).

2.3. Mô hình tính toán và phân tích

Lực ma sát của cột cần khoan khi kéo trong giếng nghiêng được biểu diễn:

$$F_f = \mu W \sin \theta \quad (2)$$

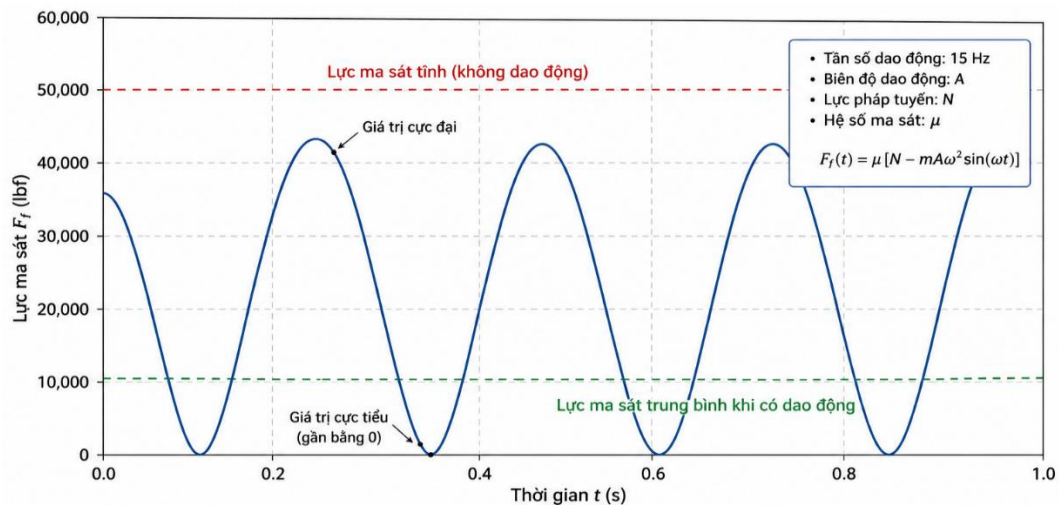
Khi có dao động:

$$F_f(t) = \mu [N - mA\omega^2 \sin(\omega t)] \quad (3)$$

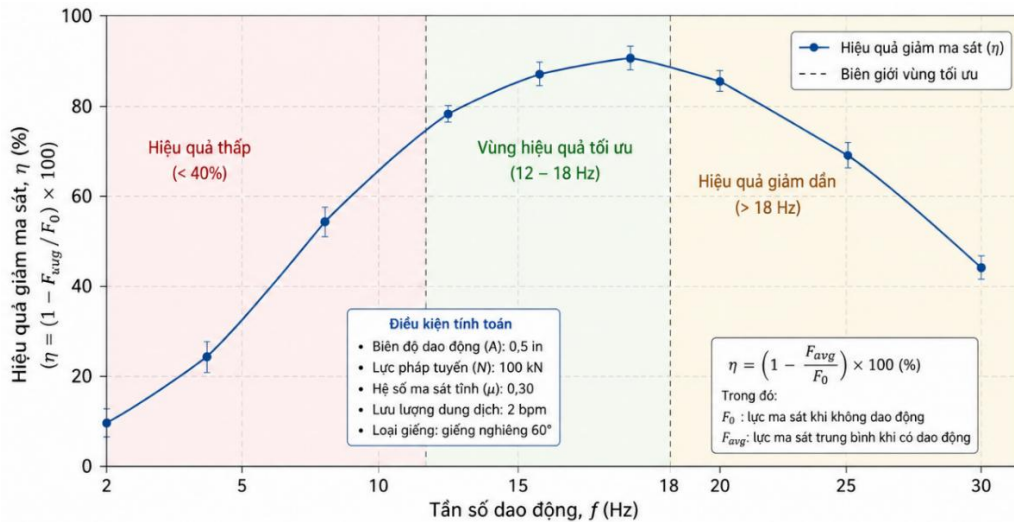
Giá trị trung bình:

$$F_{avg} = \mu N (1 - \alpha) \quad (4)$$

$$\text{Với } \alpha = \frac{mA\omega^2}{N}.$$



Hình 2. Biến thiên ma sát theo thời gian khi có dao động dọc trục (Ghasemlooia và nnk., 2014).



Hình 3. Ảnh hưởng của tần số dao động đến hiệu quả giảm ma sát (Baker Hughes INTEQ, 1999).

Trong trường hợp không có dao động, tải kéo tăng mạnh theo góc nghiêng; khi có RatPACK™, độ dốc của đường cong giảm đáng kể. Chính sự kết hợp của nhiều cơ chế vật lý sẽ làm tăng hiệu quả hoạt động cứu kẹt của RatPACK™, cụ thể:

(1) Giảm lực pháp tuyến hiệu dụng

Trong giếng nghiêng, lực ma sát được biểu diễn:

$$F_f = \mu N \quad (5)$$

Với $N = W \sin \theta$

Dao động dọc trục tạo ra lực quán tính (F_i):

$$F_i = mA\omega^2 \sin(\omega t) \quad (6)$$

Lực này làm giảm lực pháp tuyến hiệu dụng (N_{ef}) theo thời gian:

$$N_{ef} = N - F_i \quad (7)$$

Do đó:

$$F_f(t) = \mu(N - F_i) \quad (8)$$

Tại một số thời điểm trong chu kỳ dao động $F_i \approx N$. Khi lực ma sát giảm gần bằng 0, tạo điều kiện cho ống khai thác dịch chuyển.

(2) *Chuyển từ ma sát tĩnh sang ma sát động*

Theo Ghasemloonia và nnk. (2014), dao động liên tục có thể phá vỡ trạng thái kẹt-trượt và chuyển tiếp xúc sang trạng thái trượt vi mô. Khi đó:

$$\mu_d < \mu_s \quad (9)$$

Trong đó: μ_s - hệ số ma sát tĩnh; μ_d - hệ số ma sát động; N - lực pháp tuyến giữa cột cần khoan và thành giếng; w - Tải trọng cột cần khoan; θ - góc nghiêng của giếng; m - Khối lượng hiệu dụng.

Điều này làm giảm đáng kể lực kéo cần thiết để giải phóng thiết bị.

(3) *Phá vỡ cấu trúc mảnh vụn cơ học và cặn*

Các nghiên cứu về vận chuyển kết hợp rung động cho thấy dao động có thể gây tái sắp xếp cấu trúc hạt và làm giảm độ bền liên kết của mảnh vụn cơ học/cặn trong môi trường giới hạn (Saadeldin và nnk., 2023).

Trong nghiên cứu này, sự hiện diện của mảnh vụn cơ học/cặn được xem là nguyên nhân làm tăng trạng thái kẹt cơ học. Dao động liên tục đã góp phần phá vỡ cấu trúc vật liệu xung quanh packer, tạo điều kiện cho thiết bị di chuyển.

Các nghiên cứu về động lực học cho thấy hệ số α có thể đạt giá trị cao trong điều kiện dao động tối ưu, dẫn đến giảm đáng kể lực ma sát trung bình (Ghasemloonia và nnk., 2014). Điều này phù hợp với dữ liệu thực nghiệm, trong đó mức giảm lực kéo đạt tới 80-90%.

3. Kết quả thực hiện tại giếng X

3.1. Đặc điểm của giếng

Dữ liệu giếng được tổng hợp và hiệu chỉnh từ các báo cáo kỹ thuật hiện trường của Baker Hughes INTEQ, Offshore Magazine và AORG liên quan đến các công tác cứu kẹt và thu hồi thiết bị trong quá trình hoàn thiện giếng khi giếng định hướng có độ nghiêng lớn tại Bắc Mỹ. Một số thông số vận hành được chuẩn hóa và mã hoá nhằm đảm bảo tính bảo mật dữ liệu hiện trường, tuy nhiên vẫn bảo toàn đặc trưng kỹ thuật và xu hướng vận hành thực tế của quá trình cứu kẹt (Baker Hughes INTEQ; 1999, Offshore Magazine, 2000; American Oil and Gas Reporter, 2023).

Giếng X là giếng định hướng có độ nghiêng lớn, xảy ra sự cố kẹt ống khai thác và packer trong quá trình thu hồi thiết bị hoàn thiện giếng. Giai đoạn xử lý ban đầu, tải kéo bề mặt được tăng dần đến khoảng 175.000 lbf (~778 kN), tuy nhiên thiết bị vẫn không dịch chuyển. Tiếp theo, sử dụng búa thủy lực nhưng không tạo được hiệu quả giải phóng rõ rệt.

Các dấu hiệu hiện trường cho thấy năng lượng va đập bị suy hao mạnh dọc chuỗi ống khai thác do ma sát lớn tại các đoạn tăng góc nghiêng và ổn định góc nghiêng. Ngoài ra, sự hiện diện của cặn và mảnh vụn cơ học được xác định là nguyên nhân làm gia tăng lực cản cơ học tại vị trí packer. Bảng 2 trình bày tình trạng của giếng khi xảy ra kẹt.

Bảng 2. Điều kiện giếng và thông số vận hành cứu kẹt ban đầu.

Thông số	Giá trị
Loại giếng	Giếng khoan định hướng
Độ sâu TVD (True Vertical Depth)	~3.200 m
Độ sâu MD (Measured Depth)	~4.850 m
Góc nghiêng cực đại	68°
Loại sự cố	Kẹt ống/packer
Môi trường giếng	Có mảnh vụn cơ học và cặn
Dung dịch	Gốc nước muối
Phương pháp ban đầu	Kéo thẳng kết hợp sử dụng búa thủy lực
Kết quả ban đầu	Không thành công

3.2. Triển khai công nghệ RatPACK™

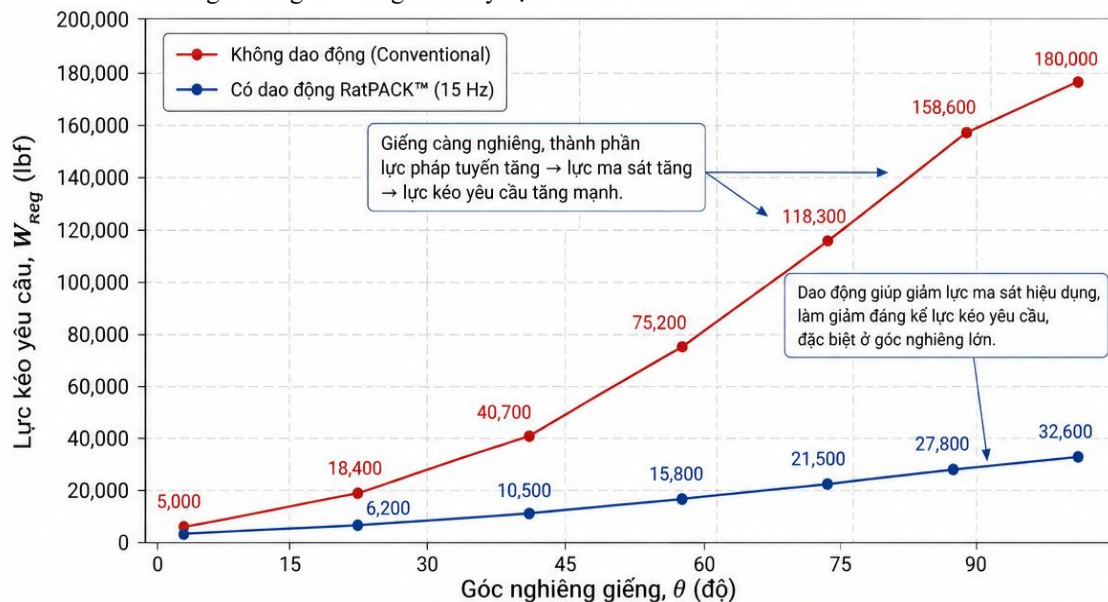
Sau khi các phương pháp truyền thống không đạt hiệu quả, công cụ RatPACK™ được bố trí gần vị trí dự kiến xảy ra kẹt nhằm giảm tổn thất năng lượng truyền dọc cột cần khoan. Khi hệ thống đạt điều kiện dao động ổn định, tải kéo bề mặt giảm đáng kể và xuất hiện các dao động tải tuần hoàn trên móc treo. Đây là dấu hiệu cho thấy dao động đã được truyền hiệu quả đến vị trí kẹt.

Sau khoảng 8 phút vận hành, thiết bị bắt đầu dịch chuyển với tải kéo khoảng 22.000 lbf (~98 kN), thấp hơn gần 87% so với tải kéo trước đó. Bảng 3 trình bày thông số vận hành RatPACK™.

Bảng 3. Thông số vận hành RatPACK™ (Baker Hughes INTEQ, 1999).

Thông số	Giá trị
Lưu lượng bơm	1.8 bpm
Áp suất vận hành	~1.250 psi
Tần số dao động	~15 Hz
Thời gian kích hoạt	~8 phút
Biên độ dao động	Nhỏ - trung bình
Loại dao động	Axial vibration

Hình 4 thể hiện hiệu quả áp dụng khi cứu kẹt. Kết quả cho thấy RatPACK™ làm giảm khoảng 87% tải kéo cần thiết và rút ngắn đáng kể thời gian xử lý sự cố.



Hình 4. Kết quả giảm lực kéo khi cứu kẹt tại giếng X.

4. Thảo luận

Kết quả phân tích lý thuyết và dữ liệu hiện trường cho thấy công nghệ dao động dọc trục RatPACK™ có hiệu quả rõ rệt trong xử lý sự cố kẹt thiết bị tại các giếng có độ nghiêng lớn. Kết quả cho thấy cơ chế giảm ma sát của RatPACK™ chủ yếu liên quan đến sự suy giảm lực pháp tuyến hiệu dụng và quá trình chuyển đổi từ ma sát tĩnh sang ma sát động dưới tác động của dao động dọc trục.

Trong các giếng khoan định hướng và giếng ngang, lực ma sát giữa cột cần khoan và thành giếng tăng nhanh theo góc nghiêng do thành phần tải trọng pháp tuyến tỷ lệ với $W \cdot \sin\theta$ (Mitchell và Miska, 2011). Khi chiều dài tiếp xúc tăng, năng lượng truyền từ bề mặt xuống đáy giếng bị suy hao đáng kể, làm cho các phương pháp truyền thống như kéo thẳng hoặc va đập thủy lực không đạt hiệu quả mong muốn. Điều này phù hợp với kết quả thực tế trong nghiên cứu này, khi tải kéo tới khoảng 175.000 lbf (~778 kN) vẫn không tạo được dịch chuyển đáng kể của thiết bị.

Kết quả phân tích cho thấy tại một số thời điểm trong chu kỳ dao động, lực quán tính có thể đạt giá trị gần bằng lực pháp tuyến, tạo ra trạng thái “ma sát cực thấp”. Đây là cơ chế quan trọng giúp giải phóng thiết bị trong điều kiện giếng nghiêng có ma sát lớn.

Ngoài cơ chế giảm ma sát, dao động liên tục còn giúp phá vỡ trạng thái kẹt-trượt và chuyển tiếp xúc từ ma sát tĩnh sang ma sát động. Theo Ghasemloonia và nnk. (2014), hệ số ma sát động luôn nhỏ hơn hệ số

ma sát tĩnh, do đó việc duy trì dao động liên tục giúp giảm đáng kể lực kéo cần thiết để khởi động chuyển động của thiết bị. Cơ chế này phù hợp với kết quả thực nghiệm khi tải kéo yêu cầu giảm từ khoảng 175.000 lbf xuống còn 22.000 lbf.

Một cơ chế quan trọng khác là ảnh hưởng của dao động đến môi trường vật liệu xung quanh điểm kẹt. Trong nhiều trường hợp thực tế, kẹt ống không chỉ xuất phát từ ma sát đơn thuần mà còn do sự tích tụ của mùn khoan, cặn hoặc mảnh vụn cơ học tạo thành các “câu vật liệu” có độ bền cơ học cao. Theo Saadeldin và nnk. (2023), dao động dọc trục có thể gây tái sắp xếp cấu trúc hạt và làm giảm độ bền liên kết của vật liệu trong môi trường giới hạn. Điều này đặc biệt quan trọng đối với các giếng nghiêng dài, nơi mùn khoan dễ hình thành và làm gia tăng nguy cơ kẹt chèn ép hoặc tắc khoảng không vành xuyên.

So với va đập thủy lực/va đập cơ học, RatPACK™ cho thấy ưu thế rõ rệt trong điều kiện giếng khoan vươn xa. Búa thủy lực truyền năng lượng dưới dạng xung lực ngắn và dễ bị suy hao dọc cột cần khoan, đặc biệt khi ma sát lớn. Ngược lại, RatPACK™ cung cấp dao động liên tục với tần số ổn định, cho phép duy trì trạng thái kích thích tại điểm kẹt trong thời gian dài hơn. Điều này giúp nâng cao hiệu quả truyền năng lượng và giảm nguy cơ làm tăng trạng thái kẹt cơ học do tải va đập quá lớn (Zhang và nnk., 2021).

Kết quả phân tích cũng cho thấy hiệu quả của công nghệ phụ thuộc đáng kể vào các thông số vận hành, đặc biệt là tần số dao động, lưu lượng bơm và vị trí bố trí công cụ trong bộ khoan cụ đáy. Trong nghiên cứu này, dải tần 12-18 Hz cho thấy hiệu quả tối ưu, phù hợp với dữ liệu thiết kế của Baker Hughes (1999). Nếu tần số quá thấp, lực quán tính không đủ để giảm lực pháp tuyến; ngược lại, tần số quá cao có thể gây suy giảm hiệu quả truyền dao động do giảm chấn trong cột cần khoan.

Mặc dù cho thấy hiệu quả cao trong các trường hợp kẹt do ma sát hoặc mảnh vụn cơ học, công nghệ RatPACK™ vẫn tồn tại một số hạn chế. Trong các trường hợp kẹt cứng do xi măng có độ bền cao, méo ống hoặc biến dạng cơ học nghiêm trọng, dao động đơn thuần có thể không đủ để giải phóng thiết bị. Khi đó cần kết hợp với búa thủy lực, dụng cụ nghiền hoặc các giải pháp cứu kẹt chuyên dụng khác. Ngoài ra, hiệu quả của công nghệ còn phụ thuộc mạnh vào điều kiện thủy lực và đặc tính cơ học của cột cần khoan, đòi hỏi phải tối ưu hóa thiết kế và chương trình vận hành cho từng điều kiện giếng cụ thể.

Từ góc độ vận hành và kinh tế, việc giảm đáng kể tải kéo và thời gian xử lý kẹt ống mang lại lợi ích rất lớn đối với các chiến dịch khoan và can thiệp giếng. Theo Offshore Magazine (2000), việc giảm vài giờ phi sản xuất trong các giếng khoan nước sâu hoặc khoan vươn xa có thể tiết kiệm hàng trăm nghìn USD chi phí thuê giàn khoan. Đồng thời, việc hạn chế tải kéo cực đại còn góp phần giảm nguy cơ phá hủy do mỏi, đứt gãy và hư hỏng thiết bị hoàn thiện giếng.

Trong bối cảnh các mỏ dầu khí Việt Nam ngày càng gia tăng tỷ lệ giếng khoan định hướng và giếng ngang, công nghệ dao động dọc trục có tiềm năng ứng dụng lớn nhằm giảm ma sát, cải thiện khả năng truyền tải tải trọng và nâng cao hiệu quả xử lý sự cố. Điều này đặc biệt phù hợp với xu hướng phát triển các giếng khoan vươn xa tại thềm lục địa Việt Nam trong giai đoạn hiện nay.

5. Kết luận

Nghiên cứu đã đánh giá hiệu quả của công nghệ dao động thủy lực Downhole Vibration - RatPACK™ trong xử lý sự cố kẹt thiết bị tại các giếng khoan có độ nghiêng lớn thông qua phân tích cơ sở lý thuyết, mô hình tính toán và dữ liệu hiện trường.

Kết quả nghiên cứu cho thấy dao động dọc trục làm giảm đáng kể lực pháp tuyến hiệu dụng giữa cột cần khoan và thành giếng, từ đó làm giảm lực ma sát trung bình trong hệ thống. Đồng thời, dao động còn hỗ trợ phá vỡ trạng thái kẹt-trượt và làm suy yếu cấu trúc của mảnh vụn/cặn tại điểm kẹt, góp phần cải thiện khả năng giải phóng thiết bị.

Trong nghiên cứu được phân tích, tải kéo cần thiết để giải phóng ống/packer giảm từ khoảng 175.000 lbf (~778 kN) xuống còn khoảng 22.000 lbf (~98 kN), tương ứng mức giảm gần 87%. Thời gian xử lý sự cố cũng giảm từ nhiều giờ xuống còn khoảng 8 phút sau khi kích hoạt RatPACK™. Kết quả này phù hợp với cơ sở lý thuyết và các nghiên cứu trước đây về cơ chế giảm ma sát nhờ dao động dọc trục.

Nghiên cứu cũng cho thấy hiệu quả của công nghệ tăng rõ rệt trong các giếng có độ lệch lớn, nơi lực ma sát chi phối hành vi cơ học của hệ thống. Dải tần dao động 12-18 Hz được xác định là vùng vận hành tối ưu cho quá trình giảm ma sát và truyền năng lượng.

So với các phương pháp truyền thống như kéo thẳng và va đập thủy lực, RatPACK™ cho thấy ưu thế rõ rệt về khả năng giảm tải kéo, hạn chế suy hao năng lượng và giảm nguy cơ hư hỏng thiết bị. Tuy nhiên, trong các trường hợp kẹt cứng do xi măng hoặc biến dạng cơ học nghiêm trọng, công nghệ cần được kết hợp với các giải pháp cứu kẹt khác để đạt hiệu quả tối ưu.

Các kết quả nghiên cứu khẳng định RatPACK™ là một giải pháp hiệu quả và có tiềm năng ứng dụng rộng rãi trong hoạt động cứu kẹt và sửa giếng, đặc biệt đối với các giếng định hướng và giếng ngang tại Việt Nam. Việc áp dụng công nghệ này có thể góp phần giảm thời gian phi sản xuất, tối ưu chi phí vận hành và nâng cao hiệu quả khai thác trong điều kiện mỏ dầu khí hiện đại.

Tài liệu tham khảo

- Aadnøy, B.S., Cooper, I., (2010). *Stick and Slip in Oilwell Drillstrings*, University of Stavanger, Norway.
- Baker Hughes INTEQ, (1999). *Fishing Services Seminar - Downhole Vibration Tools*, Baker Hughes Technical Training Manual, Houston, USA.
- Ghasemloonia, Ali; Rideout, Douglas G.; Butt, S. D., (2014). “A Review of Drillstring Vibration Modeling and Suppression Methods”, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, Vol. 116, pp. 36-52.
- Mitchell, R.F., Miska, S.Z., (2011). *Fundamentals of Drilling Engineering*, Society of Petroleum Engineers (SPE), Richardson, Texas.
- Saadeldin, Rami; Elkatatny, Samy; Mahmoud, Mohamed, (2023). “Downhole Vibrations in Horizontal and Extended Reach Wells: Mechanisms and Mitigation”, *Journal of Energy Resources Technology*, Vol. 145(7), pp. 1-14.
- Zhang, Hongwei; Wang, Xiaolei; Li, Yong, (2021). “Friction Reduction Technologies in Extended-Reach and Horizontal Wells: A Review”, *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, Vol. 88, 103857.
- Offshore Magazine, (2000). “New Vibratory Tool Extracts Stuck Liners, Tubing and Packers in Cased-Hole Environment”, *Offshore Magazine*, Gulf Publishing Company, Houston, USA.
- American Oil and Gas Reporter (AOGR), (2023). “Downhole Vibratory Tools Improve Drilling and Completion Performance in Long Lateral Wells”, *AOGR Technical Report*, Houston, USA.

ABSTRACT

Evaluation of the effectiveness of Downhole Vibration technology - RatPACK™ in mitigating stuck pipe incidents in highly deviated oil and gas wells

Nguyen Van Thanh, To Huu Toan, Nguyen Khac Long, Doan Thi Tram,
Le Quang Duyen, Le Van Nam
Hanoi University of Mining and Geology, Hanoi, Vietnam

Stuck pipe is one of the primary causes of non-productive time in directional and horizontal wells due to the high frictional forces between the tubular string and the wellbore wall. Conventional remediation methods, such as overpull and hydraulic jarring, often exhibit limited effectiveness because of significant energy dissipation along the string. This study evaluates the effectiveness of Downhole Vibration technology - RatPACK™ for mitigating stuck pipe incidents in highly deviated wells through theoretical analysis, dynamic modeling, and field data evaluation. The friction-reduction mechanism of RatPACK™ was analyzed based on axial oscillation and the transient reduction of the effective normal force acting between the tubular string and the wellbore wall. The results indicate that axial vibration promotes the transition from static friction to dynamic friction, thereby significantly reducing the average frictional force and improving load transfer efficiency in deviated wells. In the investigated case study, the pulling force required to release the stuck tubing/packer decreased from approximately 175,000 lbf (~778 kN) to 22,000 lbf (~98 kN), corresponding to a reduction of nearly 87%. In addition, the recovery time was reduced to approximately 8 minutes after activation of the vibration tool. Optimal operational performance was achieved within the vibration frequency range of 12-18 Hz. The findings demonstrate that RatPACK™ is an effective solution for friction-related stuck pipe incidents in directional and horizontal wells, contributing to reduced non-productive time and improved efficiency of fishing and well intervention operations.

Keywords: Stuck pipe; Axial vibration; RatPACK™; Directional well; Fishing job.