

NGHIÊN CỨU TƯƠNG TÁC CỦA LỰC THỦY ĐỘNG CỦA SÓNG LÊN BỂ CHỨA NỔ VÀ TÀU CHỞ KHÍ HÓA LỎNG TRONG TRẠNG THÁI KHAI THÁC CẬP MẠN

TS. Phạm Hiến Hậu

Đại học Xây dựng

Email: phienhau@gmail.com

Tóm tắt

Tàu chở khí hóa lỏng (LNGC) cập mạn với bể chứa khí hóa lỏng nổi (FLNG) là phương án neo phổ biến và hiệu quả nhất để quãng đường xuất khí LNG là ngắn nhất, đảm bảo công nghệ làm lạnh khí hóa lỏng ở nhiệt độ khoảng -160°C . Tuy nhiên, hình thức khai thác này có thể ảnh hưởng bất lợi đến bể chứa nổi và tàu. Bài báo giới thiệu các nghiên cứu lý thuyết và thực nghiệm của hiện tượng tương tác giữa các lực thủy động của sóng với hai vật thể nổi có kích thước lớn trong quá trình khai thác kiểu cập mạn.

Kết quả nghiên cứu đã được ứng dụng cho điều kiện mỏ Bạch Hổ, với các tính toán có sử dụng phần mềm chuyên dụng HydroStar của Hãng kiểm Pháp, để so sánh với trường hợp chỉ có bể chứa nổi để đánh giá mức độ gia tăng của bề mặt sóng biển tại khoảng hở giữa FLNG và LNGC khi đang tiếp nhận khí hóa lỏng ở trạng thái cập mạn. Từ đó, tác giả rút ra kết luận về sự tương tác của sóng đến FLNG - LNGC khi neo kiểu cập mạn và đánh giá ảnh hưởng đến sự an toàn của công trình khai thác.

Từ khóa: Tương tác thủy động học, lực sóng, bể chứa khí hóa lỏng nổi, tàu chở khí hóa lỏng, LNG, khai thác kiểu cập mạn, tương tác nhiều vật thể.

1. Giới thiệu

Nghiên cứu lực thủy động của sóng tương tác lên FLNG và LNGC trong khi đang khai thác cập mạn là những nghiên cứu mới ở Việt Nam, có tính ứng dụng cao trong việc phát triển các dự án nghiên cứu khoa học và phục vụ cho công tác đào tạo chuyên ngành kỹ thuật xây dựng công trình biển. Nghiên cứu này còn có thể áp dụng cho tính toán tương tác lực thủy động của sóng lên hệ thống các tàu bè, phương tiện nổi neo giữ kiểu cập mạn khác.

Tác giả đã giới thiệu tổng quan về FLNG và các trạng thái xuất các sản phẩm dầu khí; cơ sở lý thuyết tính toán tác động của lực thủy động của sóng nhiều xạ bức xạ lên một vật thể kích thước lớn và tương tác của sóng với hai vật thể cập mạn. Trên cơ sở tổng hợp các nghiên cứu trên

thế giới qua kết quả mô hình hóa và thực nghiệm, tác giả đã rút ra hệ số cân sử dụng cho vùng nước tương tác giữa 2 vật thể. Phần áp dụng số thực hiện tại mỏ Bạch Hổ, nơi có độ sâu nước nông (50m nước) so với các nghiên cứu đã thực hiện trên thế giới để xem xét tác động của sóng đến FLNG và LNGC, sự ảnh hưởng đến cao độ bề mặt sóng, các dịch chuyển và lực sóng tại khoảng hở giữa 2 vật thể... Từ đó, tác giả đưa ra khuyến cáo với các chu kỳ sóng gây cộng hưởng, nhạy cảm với hoạt động khai thác của 2 tàu cập mạn.

Phương pháp nghiên cứu:

- Nghiên cứu lý thuyết phân tích thủy động lực học tác động lên bể chứa khí hóa lỏng nổi trong 2 trường hợp: chỉ có FLNG và FLNG - LNGC đang khai thác kiểu cập mạn.



Hình 1. Bể chứa khí hóa lỏng nổi (FLNG)

Từ bài toán hàm thế nhiều xạ bức xạ bậc 1 và bậc 2 của sóng tác động quanh vật thể kích thước lớn để xác định lực thủy động tác dụng lên bể chứa nổi trong 2 trường hợp trên.

- Tổng hợp các nghiên cứu trên thế giới qua kết quả mô hình hóa và thực nghiệm để rút ra hệ số cần sử dụng cho vùng nước tương tác giữa hai tàu.

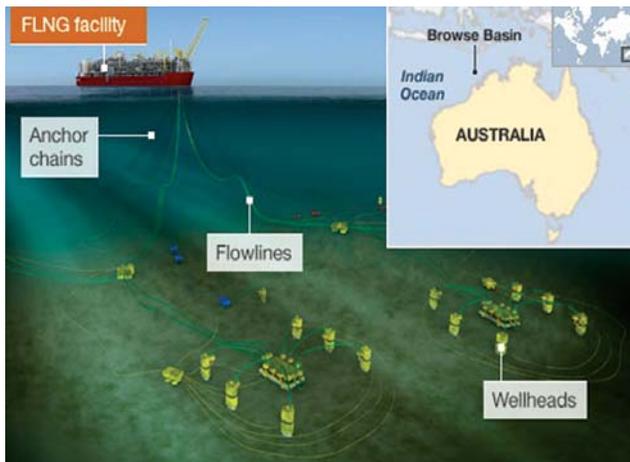
- Tính toán thủy động lực học bằng chương trình HydroStar tính tương tác của lực sóng lên bể chứa khí hóa lỏng nổi trong 2 trường hợp: chỉ có FLNG (BT1) và FLNG - LNGC đang khai thác kiểu cập mạn (BT2).

- Phân tích đánh giá kết quả tính toán: So sánh 2 trường hợp tính toán để đánh giá độ gia tăng của mớn nước giữa 2 vật thể nổi do sóng tương tác với 2 vật thể đứng song song cạnh nhau, đánh giá sự ảnh hưởng đó đến hệ neo giữ công trình.

2. Tổng quan về FLNG và trường hợp khai thác cập mạn

2.1. Vai trò và vận hành FLNG

Việc phát triển các mỏ khí ngoài khơi cần chi phí đầu tư ban đầu rất lớn, do các mỏ khí thường ở sâu trong lòng đại dương và xa bờ. Cách thức truyền thống của việc khai thác khí ở ngoài khơi và vận chuyển khí vào bờ là thông qua hệ thống đường ống. Một giải pháp hiệu quả khác



Hình 2. FLNG khai thác và chế biến khí tại mỏ



Hình 3. Bể chứa khí hóa lỏng Prelude (Shell)

được áp dụng trên thế giới là sử dụng FLNG để khai thác khí tự nhiên từ mỏ mà không cần xây dựng cơ sở hạ tầng cố định như: hệ thống đường ống hoặc nhà máy chế biến khí trên bờ. Khi mỏ khai thác hết khí, chỉ cần nhổ cọc neo và di chuyển FLNG tới mỏ khí khác. Khí khai thác từ mỏ được đưa lên bể chứa, được hóa lỏng bằng công nghệ làm lạnh đến -160°C và nén lại thu nhỏ thể tích của khí tới 600 lần nên có thể vận chuyển được đến các vùng xa. Khí hóa lỏng được chứa trong thùng chứa lớn tại bể chứa, sau đó được chuyển sang tàu LNGC để vận chuyển tới các hộ tiêu thụ.

Công đoạn sản xuất tách lọc chế biến khí được thực hiện trên FLNG ngay tại mỏ khí ngoài biển. FLNG được thiết kế để hoạt động một cách an toàn và luôn được neo giữ tại mỏ ngay cả trong điều kiện thời tiết khắc nghiệt nhất.

2.2. Bể chứa khí hóa lỏng nổi FLNG trên thế giới

Trên thế giới hiện có nhiều FLNG đang sử dụng để khai thác khí hóa lỏng. Dự kiến vào năm 2017, bể chứa nổi lớn nhất thế giới (Prelude của Shell) sẽ neo ở ngoài khơi cách 200km từ bờ biển phía Tây Bắc của Australia để khai thác khí tự nhiên từ mỏ khí Prelude ở độ sâu 250m nước.

Bể chứa khí hóa lỏng nổi này dài 488m, rộng 75m và cao 105m, Turret cao 93m với 4 cụm dây xích neo và neo bằng cọc mút. Khi chứa đầy tải, Prelude FLNG sẽ nặng 600.000 tấn, gấp 6 lần tàu sân bay lớn nhất của Mỹ. Mặc dù vậy công trình này chỉ bằng $\frac{1}{4}$ kích thước của một nhà máy tương đương trên đất liền. Các kỹ sư đã thiết kế các module xếp theo chiều dọc để tiết kiệm không gian; đồng thời đưa ra các ý tưởng bơm nước lạnh từ sâu trong đại dương để giúp làm mát khí. Khí được hóa lỏng ở nhiệt độ -162°C . Prelude FLNG có khả năng chứa 220.000m³ LNG, 90.000m³ LPG và 126.000m³ condensate, tương đương với khoảng 175 bể bơi Olympic. Ước tính tổng mức đầu tư của Dự án Prelude FLNG khoảng 10,8 - 12,6 tỷ USD [17, 18].

2.3. Phương pháp xuất khí hóa lỏng từ FLNG sang LNGC

Dựa vào chất chứa trong bể chứa nổi là dầu hay khí hóa lỏng để lựa chọn một trong hai cách xuất sản phẩm: kiểu nối đuôi hoặc kiểu cập mạn. Kiểu nối đuôi (tandem) sẽ giảm thiểu ảnh hưởng tương tác của trường sóng giữa 2 tàu tác dụng lên nhau, tuy nhiên quãng đường vận chuyển dài. Cách này phổ biến đối với các bể chứa dầu nổi FPSO. Kiểu cập mạn (side by side) không phổ biến cho FPSO vì trường sóng xung quanh mỗi tàu sẽ ảnh hưởng tương tác lên nhau, gây bất lợi cho cả hệ.

Kiểu xuất sản phẩm phù hợp với khí hóa lỏng (LNG) là kiểu khai thác cập mạn (Hình 4) do yêu cầu công nghệ



Hình 4. Xuất khí hóa lỏng từ FLNG sang LNGC kiểu cập mạn

làm lạnh khí để hóa lỏng ở nhiệt độ -160°C. Cập mạn song song sẽ tăng số lượng ống dẫn và giảm quãng đường vận chuyển để đảm bảo nhiệt độ hóa lỏng của khí trong quá trình vận chuyển.

3. Lực thủy động của sóng tác động lên một vật thể

3.1. Điều kiện xuất phát

Cho 1 hàm thế của vận tốc dòng:

$$\vec{V}(M, t) = \overrightarrow{\text{grad}} \Phi(M, t) \quad (1)$$

$$\Phi = \Phi_0 + \Phi_p = \Phi_0 + (\Phi_j + \Phi_7) \quad (2)$$

Trong đó:

Φ_0 : Hàm thế của vận tốc sóng tới, khi chưa có vật thể (thể hiện trạng thái biển cách xa vật thể);

Φ_p : Hàm thế của dòng chảy nhiễu loạn;

Φ_j : Hàm thế của dòng chảy bức xạ sinh ra do vật thể chuyển động trong môi trường biển lặng không có sóng tới, gồm 6 chuyển động (thẳng và xoay) quanh 3 trục;

Φ_7 : Hàm thế của dòng chảy nhiễu xạ sinh ra do sóng tới đập vào vật thể được giữ cố định không chuyển động.

Theo nghiên cứu [6, 7], hàm thế được viết dưới dạng:

$$\varphi = \iint_H ds \left(-i\omega \sum_{j=1}^6 a_j \sigma_j + a_0 \sigma_7 \right) G + a_0 \varphi_0 \quad \text{i.e.} \quad \varphi_j = \iint_H ds \sigma_j G \quad (3)$$

$$\omega^2 A_{kj} + i\omega B_{kj} = -i\omega (i\omega - \mu) \rho \iint_H ds \phi_j n_k \quad (4)$$

$$F_k = -(i\omega - \mu) \rho a_0 \iint_H ds (\phi_0 + \phi_7) n_k \quad (5)$$

Trong đó:

Chỉ số $j = 1 - 6$ thể hiện cho 6 dịch chuyển do sóng bức xạ;

Chỉ số 7 thể hiện lực sóng nhiễu xạ;

Chỉ số 0 là lực sóng tới;

F_k : Lực cường bức gây ra bởi sóng tới và sóng nhiễu xạ.

3.2. Phương trình chuyển động cho một vật thể nổi [6, 7]

Biên độ chuyển động của vật thể nổi được đánh giá bằng cách giải 6 phương trình chuyển động:

$$\sum_{j=1}^6 \left[-\omega^2 (M_{kj} + A_{kj}) - i\omega B_{kj} + C_{kj} + C'_{kj} \right] a_j = F_k \quad (6)$$

Trong đó:

M_{kj} : Ma trận quán tính;

C'_{kj} : Ma trận độ cứng nước kèm;

$k, j = 1, 2, \dots, 6$;

F_k : Lực cường bức gây ra bởi sóng tới và sóng nhiễu xạ.

Dựa vào lời giải cho bài toán nhiễu xạ bậc 1, bậc 2 như trên, Chen [6, 7] đã xây dựng thuật toán ứng dụng trong chương trình tính lực thủy động Hydrostar. Kết quả của phần mềm này là hàm truyền của các thông số phục vụ việc tính toán thiết kế như: lực sóng bậc 1, lực sóng bậc 2, chuyển vị kết cấu, áp lực nước lên bề mặt kết cấu nổi...

3.3. Lực thủy động bậc 1

Từ các hàm thế xác định được lực thủy động bậc 1 theo công thức sau:

$$[F_H]^{(1)} = \rho \iint \frac{\partial \Phi}{\partial t} \cdot [N] dS \quad (7)$$

Lực F_H gồm các lực gây ra bởi sóng tới (lực Froude - Krilov), các lực nhiễu xạ và lực bức xạ:

$$[F_H]^{(1)} = [F_0]^{(1)} + [F_7]^{(1)} + [F_J]^{(1)} = [F_k]^{(1)} + [F_J]^{(1)} \quad (8)$$

- Lực sóng tới Froude - Krilov được tính bởi:

$$[F_0]^{(1)} = \rho \iint_H \frac{\partial \phi_0^{(1)}}{\partial t} \times [N] dS \quad (9)$$

- Lực nhiễu xạ bậc 1:

$$[F_7]^{(1)} = \Re \left\{ [F_7]^{(1)} \times e^{-i\omega t} \right\} = \rho \iint_H \frac{\partial \phi_7^{(1)}}{\partial t} \times [N] dS \quad (10)$$

- Lực bức xạ bậc 1 được tính như sau:

$$[F_J]^{(1)} = \rho \iint_H \frac{\partial \phi_J^{(1)}}{\partial t} \times [N] dS \quad (11)$$

$$= \Re \left\{ \sum_{j=1}^6 \rho \iint_H \omega^2 x_j \times \phi_j^{(1)} \times e^{-i\omega t} [N] dS \right\} = \sum_{j=1}^6 F_{kj}$$

- Lực bức xạ cũng có thể viết dạng sau:

$$[F_J]^{(1)} = [m_a] \times [\ddot{x}]^{(1)} + [B] \times [\dot{x}]^{(1)} \quad (12)$$

$$= \left\{ -\omega^2 [m_a] - i\omega [B] \right\} \times [x]$$

Trong đó:

+ Ma trận khối lượng nước kèm:

$$[m_a] = m_{kj} = -\rho \iint_H \Re(\phi_j^{(1)}) \times N_i dS \quad (k, j = 1 \rightarrow 6) \quad (13)$$

+ Ma trận cản:

$$[B] = B_{kj} = -\rho \omega \iint_H \Im(\phi_j^{(1)}) \times N_i dS = B_w \quad (k, j = 1 \rightarrow 6) \quad (14)$$

=> Công thức tính toán lực thủy động bậc 1 như sau:

$$[F_H]^{(1)} = [F_k]^{(1)} + [m_a] \times [\ddot{x}]^{(1)} + [B] \times [\dot{x}]^{(1)} \quad (15)$$

3.4. Lực thủy động bậc 2

Lực bậc 2 có hai dạng tần số ($\omega_{1 \pm} \omega_2$). Với dạng tần số cao ($\omega_{1+} \omega_2$) được ứng dụng trong hệ liên kết cứng (như TLP). Còn đối với dạng tần số thấp ($\omega_{1-} \omega_2$) được ứng dụng trong hệ liên kết mềm như bài toán tính dịch chuyển ngang của các kết cấu nổi neo xiên (lực trôi dạt chậm của FPSO, FPU), trong đó chu kỳ dao động riêng của công trình được tính bằng phút.

Lực thủy động bậc 2 gây ra bởi sóng song sắc được tính bởi công thức:

$$[F_H]^{(2)} = [F_1]^{(2)} + [F_2]^{(2)} + [F_J]^{(2)} \quad (16)$$

$[F_1]^{(2)}$: Thành phần thứ nhất của lực tác động bậc 2, chỉ phụ thuộc vào hàm thế bậc 1.

$[F_2]^{(2)}$: Thành phần thứ hai của lực tác động bậc 2, phụ thuộc vào hàm thế bậc 2 của sóng tới và của sóng nhiễu xạ.

$[F_J]^{(2)}$ Lực bức xạ bậc 2:

$$[F_J]^{(2)} = [m] \times [\ddot{x}]^{(2)} + [B] \times [\dot{x}]^{(2)} = \left\{ -(\omega_1 \pm \omega_2) [m] - i(\omega_1 \pm \omega_2) [B] \right\} \times [x] \quad (17)$$

Với $[m]$ và $[B]$ tương ứng là các ma trận khối lượng nước kèm và ma trận cản.

3.5. Lực bậc 2 tần số thấp

$$F_k(t)^{(2)} = \Re \left\{ a_j a_k^* F^{(2)}(\omega_j, \omega_k) \times e^{-i(\omega_j - \omega_k)t} \right\} \quad (18)$$

$$F^{(2)}(\omega_j, \omega_k) = F_1^{(2)}(\omega_j, \omega_k) + F_2^{(2)}(\omega_j, \omega_k)$$

Trong đó:

Chỉ số j, k biểu diễn các thông số bậc 1 tương ứng với các tần số sóng ω_j, ω_k ;

Dấu * thể hiện liên hợp phức;

$F^{(2)}$ là hàm truyền bậc 2 (QTF) của lực bậc 2 tần số thấp (Lực này dạng đầy đủ bao gồm 2 phần: Phần thứ 1 chỉ phụ thuộc vào các thông số bậc 1, phần thứ 2 phụ thuộc vào hàm thế vận tốc bậc 2).

3.6. Một số công thức gần đúng tính lực bậc 2 tần số thấp

Lực bậc 2 tần số thấp được biểu diễn nhờ khai triển chuỗi Taylor cho dạng hiệu số của tần số sóng $\Delta\omega = \omega_j - \omega_k$:

$$F^{(2)}(\omega_j, \omega_k) = F^{(2)}(\omega, \Delta\omega) = F_0^{(2)}(\omega) + F_1^{(2)}(\omega) \cdot \Delta\omega + F_2^{(2)}(\omega) \cdot \frac{\Delta\omega^2}{2} + \dots \quad (19)$$

Công thức của Newman (1974) [11]:

$$F^{(2)-}(\omega_j, \omega_k) \approx F_d^{(2)}(\omega_j = \omega_k) \text{ (lực trôi dạt chậm)} \quad (20)$$

Công thức của Pinkster (1975) [17]:

$$F^{(2)-}(\omega_j, \omega_k) \approx F_d^{(2)}\left(\frac{\omega_j + \omega_k}{2}\right) \quad (21)$$

4. Lực thủy động của sóng tương tác lên nhiều vật thể cập mạn

4.1. Phương pháp trường trung gian [6, 7, 15]

Với bài toán 2 tàu cập mạn, dù trong vùng nước sâu hay nông, vấn đề chính là phải mô tả đầy đủ chuyển động tần số thấp của hệ thống, trong đó có tải trọng sóng trôi dạt của sóng. Có 3 phương pháp tính toán tải trọng sóng trôi dạt tần số thấp: Phương pháp trường gần của Pinkster [13], trường xa của Maruo - Newman [8,10] và mới nhất là trường trung gian của Chen [6, 7]. Áp dụng trực tiếp các cải biến của lý thuyết Stokes và ứng dụng lý thuyết hàm Green, phương pháp "Trường gần" mới được tạo ra và được Chen phát triển thành **Phương pháp trường trung gian**, được viết cho bề mặt giới hạn tại một khoảng cách nhất định từ vật thể. Trường trung gian này có các ưu điểm như trường xa, có độ hội tụ số nhanh đối với lực trôi dạt ngang. Trong trường hợp nhiều vật thể, trường trung gian có thể tạo ra bề mặt giới hạn bao quanh từng vật thể và tính toán được các tải trọng sóng tác dụng lên vật thể được bao quanh đó, trong khi trường xa chỉ cung cấp tổng các tải trọng sóng trên tất cả các vật thể. Bài toán tương tác nhiều vật thể cập mạn là ứng dụng quan trọng của phương pháp trường trung gian. Trạng thái cập mạn làm gia tăng tương tác động của sóng trong khu vực khoảng hở giữa 2 vật thể.

4.2. Tương tác nhiều vật thể cập mạn [1, 2, 5, 7, 12]

Tương tác của nhiều vật thể gồm: tương tác cơ học và thủy động lực học. Tương tác cơ học được định nghĩa bởi các đặc trưng cơ học của liên kết giữa các vật thể, chỉ phụ thuộc vào thiết kế và quá trình vận hành. Tương tác

thủy động lực học phức tạp hơn và yêu cầu giải pháp đầy đủ có kể đến tương tác giữa các vật thể. Trong bài toán cập mạn tàu, trong vùng khoảng hở giữa 2 tàu, tương tác thủy động lực học có thể *triệt tiêu chuyển động* sóng ở một vài tần số sóng nào đó, nhưng lại *tạo ra chuyển động dữ dội của trường sóng* ở các tần số sóng khác. Do đó, cần đặc biệt chú ý tới *hiện tượng cộng hưởng* này. Một phương pháp mới được phát triển dựa trên giả thiết chất lỏng lý tưởng có tính đến cơ chế cản trong chất lỏng.

Phương trình chuyển động cho nhiều vật thể nổi:

Phương trình chuyển động cho nhiều vật thể (M là số vật thể) có các hình thức tương tự như công thức (6) và (4) với những thay đổi nhỏ:

$$\sum_{m=1}^M \sum_{j=1}^6 \left[-\omega^2 (\delta_{nm} M_{kj}^{nm} + A_{kj}^{nm}) - i\omega B_{kj}^{nm} + \delta_{nm} C_{kj}^{nm} + C_{kj}^{\prime nm} \right] a_j^m = F_k^n \quad (22)$$

$$\omega^2 A_{kj}^{nm} + i\omega B_{kj}^{nm} = -i\omega(i\omega - \mu) \rho \iint_{H_n} ds \phi_j^m n_k \quad (23)$$

Trong đó được xác định tương tự công thức (5):

$$F_k^n = -(i\omega - \mu) \rho a_0 \iint_H ds (\phi_0 + \phi_7) n_k \quad (24)$$

Chuyển động cộng hưởng của chất lỏng tại khoảng hở giữa 2 tàu là do tương tác thủy động lực học. Chuyển động sóng có thể được triệt tiêu hoặc bị khuếch đại phụ thuộc vào sự phân tán phức tạp giữa các vật thể. Với lý thuyết hàm dòng tuyến tính cổ điển, không có bất kỳ giới hạn nào để dự đoán chiều cao sóng ở bề mặt nước, trong khi chuyển động cộng hưởng trong thực tế phải bị cản bởi các cơ chế tiêu tán năng lượng khác nhau. Sự chuyển động không có thực này của chất lỏng làm khuếch đại tải trọng sóng trên các vật thể.

Để đưa chuyển động sóng cộng hưởng này về gần giống với thực tế, loại bỏ chuyển động sóng không có thực, Buchner và nnk [1] đã phát triển phương pháp đặt một nắp đáy (lid) lên trên vùng nước giữa hai vật thể để ngăn chặn các chuyển động sóng phi thực tế. Tuy nhiên trên thực tế, không có độ cao sóng nào còn tồn tại dưới nắp đáy cứng (rigid lid) này và có thể quan sát được nhiễu loạn xung quanh đầu của nắp do hiệu ứng nhiễu xạ. Do đó, để cho phép xuất hiện chuyển động gợn sóng trên nắp đáy, Newman [12] đưa ra phương pháp tấm thảm mềm (flexible mat) bằng cách sử dụng một tập hợp hàm đa thức của Chebychev sau đó giảm đi bằng cách sử dụng hệ số cản. Theo nghiên cứu của Chen [5], ngoài các phương pháp trên, có thể áp dụng các phương trình chính xác của chất lỏng lý tưởng hoàn toàn, còn sự tiêu tán năng lượng được biểu diễn qua hệ số cản ϵ . Phần tiêu tán xuất hiện trong điều kiện biên trên bề mặt tự do F:

$$\phi_z - k'\phi - i\epsilon k'\phi = 0 \quad P \subset F (z = 0) \quad (25)$$

Với $k' = \omega^2/g$ và ϵ là hệ số tiêu tán.

Theo nghiên cứu của Chen [5], ta có:

$$\phi(P) = \iint_S ds \sigma(Q) G(P, Q) \quad S = H \cup F' \cup F \quad (26)$$

và các phương trình tích phân để xác định các nguồn phân phối σ là:

$$2\pi\sigma(P) + \iint_S ds \sigma(Q) G_n(P, Q) = v_n \quad P \subset H \quad (27a)$$

$$4\pi\sigma(P) - \iint_S ds \sigma(Q) G_n(P, Q) = 0 \quad P \subset F' \quad (27b)$$

$$4\pi\sigma(P) + i\epsilon k' \iint_S ds \sigma(Q) G(P, Q) = 0 \quad P \subset F \quad (27c)$$

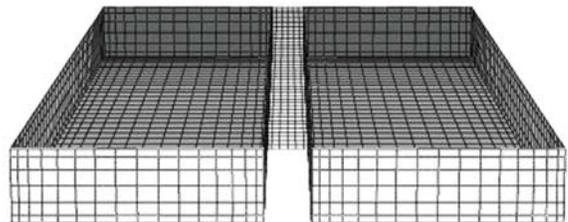
F' là diện tích bên trong của phần giao với mặt đường nước, công thức (27b) để loại bỏ các tần số không đều, công thức (27c) viết cho bề mặt tự do F. Điều quan trọng là cần sử dụng hệ số cản $\epsilon \neq 0$ ở những vùng chuyển động của chất lỏng nhạy cảm với cộng hưởng (giữa hai tàu).

4.3. Ví dụ về chia lưới cản tại vùng không gian giữa 2 tàu [2, 5]

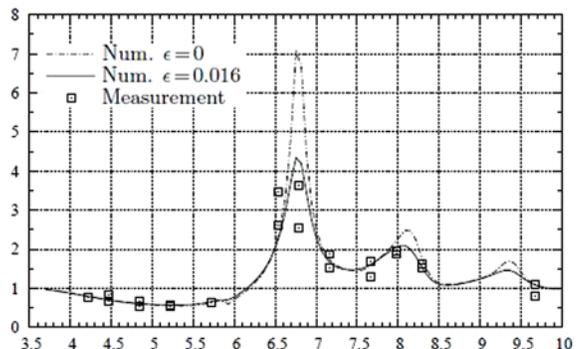
Hai sà lan trong trạng thái cập mạn có cùng kích thước: $L \times B \times T = 2,47 \times 0,6 \times 0,18$ (m) với tính chất cơ học $z_g = 0,02$, nổi tự do. Lưới của sà lan và vùng khe hở được chia như vùng cản ($\epsilon = 0,016$).

Kết quả Hình 6 cho thấy:

- Chiều cao bề mặt tự do lớn đáng chú ý ở 3 tần số sóng;
- Kết quả tính toán số với giá trị $\epsilon = 0$ (không cản) lớn hơn nhiều so với thực nghiệm trong khi với hệ số cản $\epsilon = 0,016$ tương thích tốt với kết quả đo thực nghiệm;



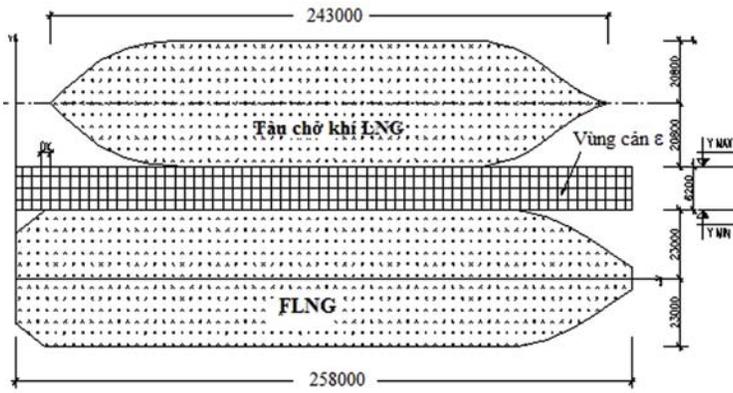
Hình 5. Hai sà lan cập mạn và vùng cản giữa 2 sà lan



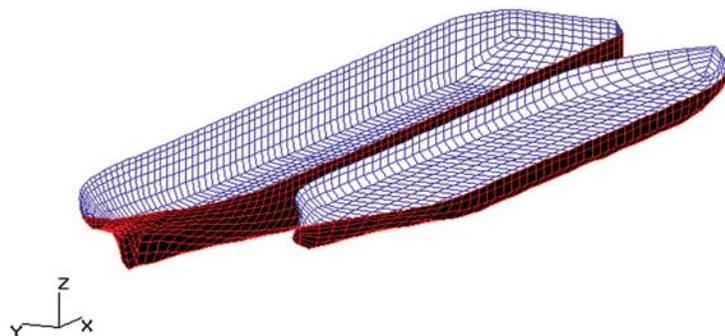
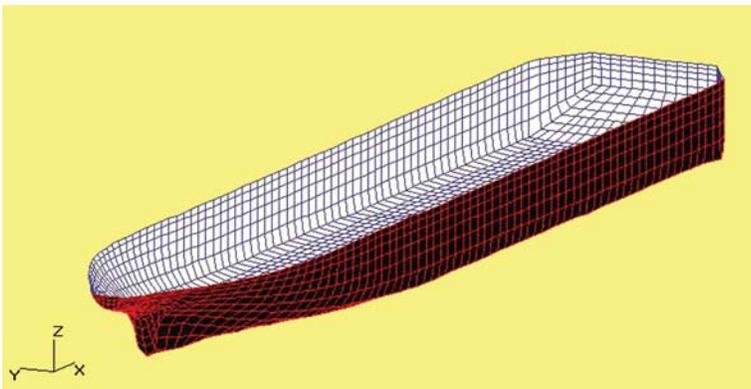
Hình 6. Cao độ mặt nước tại tâm khoảng hở [2]

Bảng 1. Các thông số kỹ thuật của FLNG và LNGC

Thông số	Đơn vị	FLNG	LNGC
Chiều dài Lpp	m	258	243
Chiều rộng B	m	46	41,6
Lượng chiếm nước đầy tải	tấn	171.930	52.019
Mớn nước đầy tải T	m	16,84	6,75



Hình 7. Sơ đồ FLNG và LNGC cập mạn



Hình 8. Hình ảnh chia lưới phần ngập nước của FLNG (BT1) và FLNG - LNGC cập mạn (BT2)

- Xa miễn cộng hưởng (nơi xảy ra sự tăng chiều cao bề mặt tự do lớn), hệ số cản ϵ (để tiêu tán năng lượng trên bề mặt tự do) không ảnh hưởng đến phản ứng chuyển động của sóng.

Qua các phân tích các nghiên cứu trước đây về bài toán cập mạn, cần thiết phải thêm vào mô hình tính một hệ số cản $\epsilon \neq 0$ (theo Chen [2] thì $\epsilon = 0,016$) để cho kết quả tính theo mô hình tương thích với

đo thực nghiệm. Hệ số cản ϵ mục đích để tiêu tán năng lượng trên bề mặt tự do vì trong mô hình tính coi chất lỏng là lý tưởng. Tác giả sẽ áp dụng kết quả nghiên cứu này cho phần ví dụ số trong điều kiện biển Việt Nam.

5. Áp dụng tính lực thủy động cho 2 tàu cập mạn song song so sánh với trường hợp một tàu

5.1. Giới thiệu phần mềm tính toán

HydroStar là một phần mềm tính toán thủy động lực học, đối tượng là các tàu thuyền hay các công trình biển mềm như: FPSO, TLP, giàn bán chìm, Spar... HydroStar được phát triển bởi Đăng kiểm Pháp (Bureau Veritas - BV) từ năm 1991. Hiện nay, HydroStar được phát triển thành phần mềm số 3D để đánh giá các bài toán nhiễu xạ và bức xạ bậc 1, bậc 2 ở độ sâu nước rất lớn hoặc ở độ sâu nước hữu hạn.

Các vấn đề được giải quyết: Tác động của sóng bậc 1, bậc 2 lên kết cấu (các bài toán nhiễu xạ và bức xạ), chuyển vị của kết cấu dưới tác dụng của sóng, áp lực sóng tại các điểm trên bề mặt kết cấu, loại bỏ các tần số không đều, bài toán tương tác nhiễu xạ vật thể, sự thay đổi tác động của sóng trong bể cảng, kết nối chương trình con Gnuplot, BV-Vship cho phép kiểm tra và hiển thị kết quả tính, tương thích sử dụng kết quả cho các chương trình tính dây neo Ariane-3D, chương trình PTHH NASTRAN cho tính kết cấu nổi.

5.2. Số liệu đầu vào

Số liệu môi trường lấy ở mỏ Bạch Hổ [15]: Sóng ngẫu nhiên ở đây được đặc trưng bởi phổ sóng JONSWAP với các thông số sóng: $H_s = 8,6m$; $T_p = 13,5s$, $\omega_{min} = 0,3 \text{ rad/s}$, $\omega_{max} = 1,1 \text{ rad/s}$, $\gamma = 1,45$. Gió và dòng chảy coi là lực tĩnh không sử dụng trong nghiên cứu này. Độ sâu nước 50m ở mỏ Bạch Hổ được coi là vùng nước nông so với các vùng biển khác trên thế giới đã được nghiên cứu.

Khi tính toán lực thủy động của sóng bằng chương trình HydroStar cần tính toán cho mọi hướng sóng và sóng tính toán là sóng đơn vị (sóng ngẫu nhiên là tập hợp của N con sóng

đơn Airy có biên độ $a = 1\text{m}$) để cho ra kết quả là hàm truyền RAO phản ứng của kết cấu dưới tác dụng của lực sóng đơn vị. Các thông số kỹ thuật của FLNG và LNGC được thể hiện trong Bảng 1.

5.3. Tính toán lực thủy động cho FLNG cực trị (BT1)

Trong nghiên cứu này, tác giả thiết lập và so sánh 2 bài toán: FLNG trong điều kiện cực trị không khai thác (BT1) theo [16] và FLNG đang khai thác xuất khí hóa lỏng cho LNGC ở trạng thái cập mạn (BT2).

Mỗi bài toán cần thiết lập các file data cho từng module tính toán riêng theo sơ đồ thuật toán của chương trình HydroStar. Phần hiển thị kết quả sử dụng Gnuplot để xem các hình ảnh RAO và BV-Vship để mô phỏng chuyển động của công trình dưới tác dụng của các loại tải trọng sóng.

Sau khi lập file dữ liệu cho các module và chạy module: Hsmsh, Hslec, Hschk, Hvisu, tác giả thu được hình ảnh chia lưới phần tử phần ngập nước của 2 bài toán để tính toán lực thủy động (Hình 8). Tiếp tục các bước tính toán theo các module Hsrdif, Hstat, Hsmec, Hsdft, Hsrao lần lượt tính lực nhiễu xạ, bức xạ, giải phương trình chuyển động để tính các dịch chuyển của tàu, lực tác động bậc 1 của sóng (sóng tới + sóng nhiễu xạ), lực trôi dạt bậc 2 của sóng theo 3 lý thuyết, xuất kết quả RAO...

Các kết quả được xuất dưới dạng text hoặc đồ thị RAO gồm: Chuyển động của tàu theo 3 phương dọc trục và 3 phương quay quanh 3 trục x, y, z, ma trận cân và ma trận khối lượng kèm, các lực sóng bậc 1 (nhiễu xạ, lực sóng tới), lực tác động của sóng bậc 2, lực trôi dạt, xuất kết quả RAO, QTF, added mass cho chương trình Ariane...

Nhận xét kết quả tính BT1 (bể chứa FLNG đứng độc lập):

- Chuyển vị: trong 3 thành phần chuyển vị thẳng thì chuyển vị dọc OY (sway) là lớn nhất vì có diện tích chắn sóng lớn nhất, chuyển vị xoay quanh OX (roll) có chuyển vị bất lợi nhất vì tàu dễ bị mất ổn định theo phương này. Tần số sóng thấp (chu kỳ dài) (Hình 10a) thì sẽ cho chuyển vị lớn, cho thấy chuyển vị phụ thuộc chủ yếu vào lực trôi dạt, lực này có chu kỳ dài.

- Lực sóng: So sánh các kết quả tương đương của sóng bậc 2 và sóng bậc 1 cho thấy, lực sóng bậc 2 rất nhỏ so với lực sóng bậc 1 (ví dụ với cùng một hướng sóng là 90° so sánh F_y do sóng bậc 2 chỉ bằng 2% so với F_y do sóng bậc 1 (chênh lệch gần 50 lần) (Hình 11a, 12a). Các kết quả của chuyển vị, lực sóng sẽ ảnh hưởng tới kết quả thiết kế hệ thống neo của FLNG.

5.4. Lực thủy động cho FLNG - LNGC trong trạng thái khai thác kiểu cập mạn (BT2)

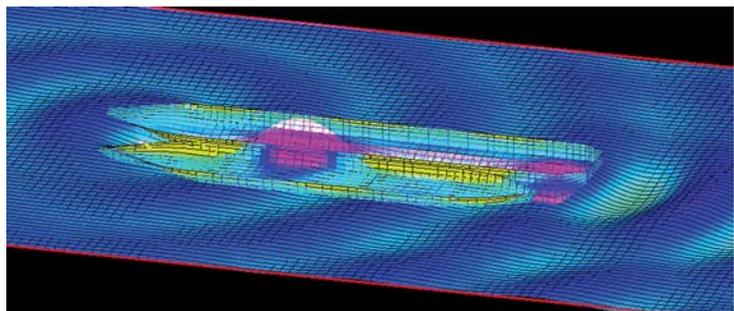
Để có thêm cơ sở lựa chọn kết quả phục vụ thiết kế, cần phải nghiên cứu tính toán lực thủy động cho FLNG trong trường hợp khai thác cập mạn (xuất khí hóa lỏng). Xét sự tương tác thủy động giữa 2 tàu thì trường hợp cập mạn (FLNG và LNGC) quan trọng hơn trường hợp nối đuôi. Tại vùng nước giữa 2 tàu sẽ có hiện tượng bề mặt sóng tăng đột ngột. Theo nghiên cứu mô hình tính toán và thực nghiệm thấy rằng trên thực tế hiện tượng cộng hưởng bị tiêu tán mất đi nhanh hơn so với mô hình tính trong phần mềm. Do vậy, trong chương trình tính phải thêm vào một hệ số giảm chấn ($\epsilon = 0,016$) tại vùng cộng hưởng giữa 2 tàu để cho kết quả tính gần với số liệu đo thực nghiệm.

- Tạo file cho BV-Vship

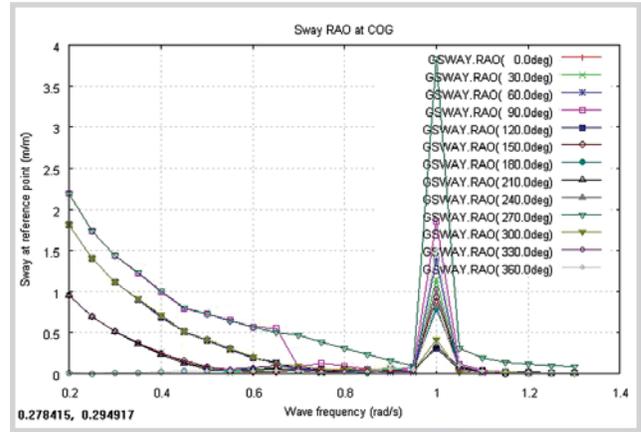
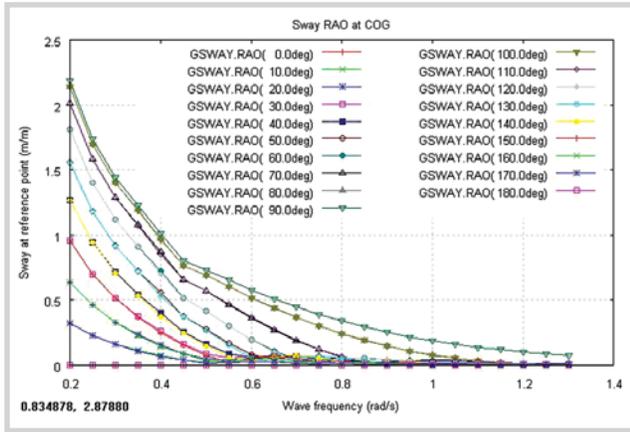
Có thể quan sát được dao động của mô hình và áp lực sóng lên tàu trên phần mềm tương tác BV-Vship. Cần phải khai báo lưới phần tử của khu vực xung quanh tàu sao cho có thể dễ nhìn thấy 2 đối tượng tính toán. Hình 9 cho thấy mơn nước tăng đột ngột trong khoảng hở giữa 2 tàu cập mạn.

So sánh kết quả RAO trường hợp cực trị (1 tàu) và trường hợp khai thác 2 tàu cập mạn: một vài kết quả chuyển vị dọc trục Y, lực sóng bậc 1 dọc trục Y, lực sóng trôi dạt bậc 2 dọc trục Y:

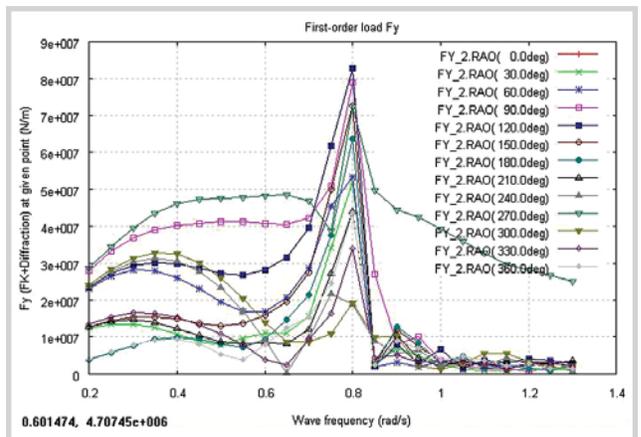
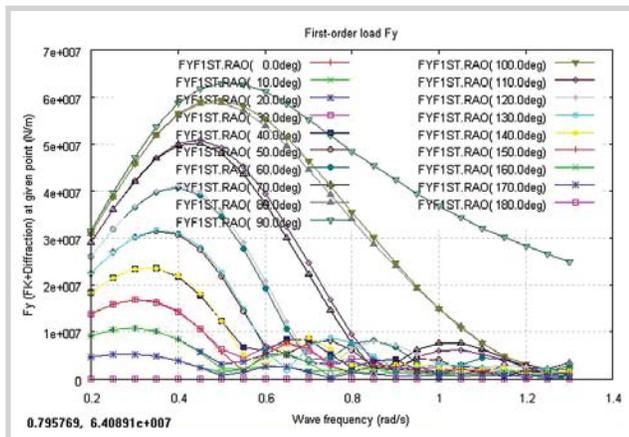
- Chuyển vị dọc OY: trường hợp cập mạn, dịch chuyển dọc Y tăng đột ngột quanh $\omega = 1\text{rad/s}$ (Hình 10);
- Lực tác động của sóng bậc 1 (FK và lực nhiễu xạ): trường hợp cập mạn, F_y cộng hưởng quanh $\omega = 0,8\text{rad/s}$ (Hình 11);
- Lực trôi dạt bậc 2: trường hợp cập mạn, lực trôi dạt bậc 2 F_y tăng đột ngột quanh $\omega = 1\text{ rad/s}$ (giá trị âm) (Hình 12).



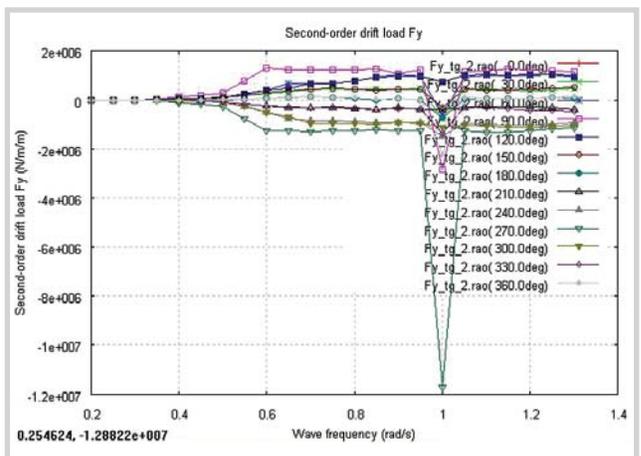
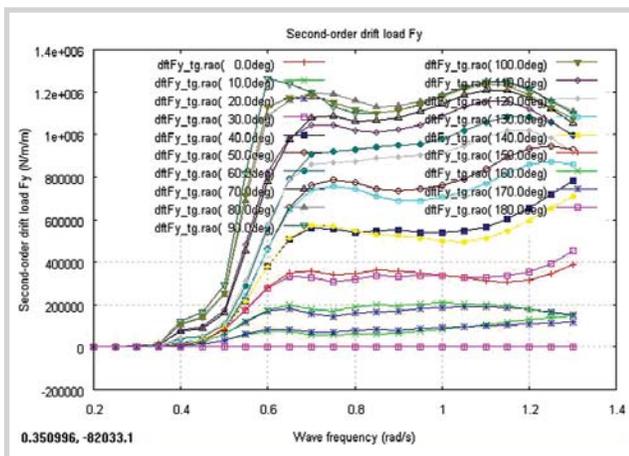
Hình 9. Cộng hưởng của chuyển động sóng trong vùng nước giữa 2 tàu



(a) (b)
Hình 10. RAO chuyển vị theo phương dọc trục OY Sway: một tàu (a) - hai tàu cập mạn (b)



(a) (b)
Hình 11. RAO lực sóng bậc 1 F_y ; một tàu (a) - hai tàu cập mạn (b)



(a) (b)
Hình 12. RAO lực trôi đạt F_y theo lý thuyết trường trung gian: một tàu (trái) - hai tàu cập mạn (phải)

5.5. Nhận xét kết quả trường hợp nghiên cứu tại mỏ Bạch Hổ

Các đồ thị hàm truyền RAO đều cho thấy rõ ảnh hưởng của cộng hưởng tại khoảng hở giữa bể chứa và tàu (vùng cản damping zone) đối với trường hợp cập mạn, đặc biệt với các dao động dọc OY, lực sóng F_y bậc 1 và lực trôi đạt F_y

của sóng bậc 2 là lớn nhất. Ở ngoài vùng cộng hưởng hình dạng các đồ thị RAO cập mạn tương đối giống với cực trị (do đầu vào đều là sóng đơn vị $a = 1m$). Đặc biệt, tại tần số quanh $\omega = 1 \text{ rad/s}$ có sự tăng đột ngột về hình dáng đồ thị. Do đó, cần phải xem xét trong khoảng tần số $\omega = 0,95 - 1,05 \text{ rad/s}$, tức là chu kỳ khoảng $T = 6 \text{ (s)}$. Do chu kỳ của sóng $T_s = 3 - 20 \text{ (s)}$ nên khi thiết kế phải tránh hiện tượng

cộng hưởng với tần số sóng gây nguy hiểm cho công trình. Quan sát hình ảnh chuyển động của 2 tàu (Hình 9) cho thấy mớn nước tăng đột ngột trong vùng nước giữa 2 tàu. Kết quả RAO cho thấy cộng hưởng trong khoảng hở giữa 2 tàu cập mạn không chỉ ảnh hưởng trường sóng địa phương mà còn làm gia tăng chuyển động bậc 1 cũng như lực trôi dạt trung bình.

6. Kết luận

Cộng hưởng trong vùng khoảng hở giữa 2 tàu cập mạn tại mỏ Bạch Hổ ảnh hưởng đến việc tính toán các chuyển động tương đối tại vị trí giữa 2 tàu để xác định tải trọng thiết kế tác dụng lên dây neo và quyết định độ nhạy cảm của hoạt động dỡ tải. Trong khi tính bài toán cập mạn, cần thiết phải thêm vào mô hình tính một hệ số cản $\varepsilon \neq 0$ (nghiên cứu này $\varepsilon = 0,016$) để cho kết quả tính theo mô hình tính tương thích với đo thực nghiệm. Hệ số cản ε mục đích để tiêu tán năng lượng trên bề mặt tự do vì trong mô hình tính coi chất lỏng là lý tưởng. Sự khác biệt đột ngột giữa tương tác thủy động học trong bài toán cực trị và bài toán khai thác cập mạn khi xảy ra hiện tượng chuyển động của bề mặt sóng tăng đột ngột (cộng hưởng) trong vùng nước giữa 2 tàu, ảnh hưởng đến độ an toàn của cả hệ thống.

Kết quả nghiên cứu trên sẽ góp phần bổ sung thêm vào các bài toán tính toán thiết kế cho FLNG trong trường hợp khai thác xuất khí hóa lỏng cho tàu LNG và mở rộng cho tính toán các loại tàu cập mạn khác. Tuy ở Việt Nam chưa có FLNG nhưng với tiềm năng các mỏ khí rất lớn, trong tương lai sẽ phát triển hướng khai thác mới và hiệu quả này. Hiện tại, nghiên cứu có thể ứng dụng cho tính toán thiết kế neo giữ các loại tàu, phương tiện nổi, sà lan dịch vụ, phục vụ thi công, khai thác ở trạng thái cập mạn. Nghiên cứu này có thể áp dụng cho bài toán thiết kế hệ thống neo giữ, liên kết hai tàu, từ đó đánh giá độ an toàn của hệ thống trong khi neo giữ kiểu cập mạn.

Tác giả trân trọng cảm ơn cơ quan Đăng kiểm Pháp (BV) đã cho phép sử dụng các phần mềm chuyên dụng (HydroStar, BV-Vship) và Đại học Xây dựng đã tạo điều kiện để tác giả thực hiện nghiên cứu này.

Tài liệu tham khảo

1. Bas Buchner, Adri Van Dijk, Jaap De Wilde. *Numerical multiple-body simulation of side-by-side mooring to an FPSO*. Proceeding of 11th International Offshore and Polar Engineering (ISOPE) Conference, Stavanger, Norway. 17 - 22 June, 2001: p. 343 - 353.

2. X.B.Chen, F.Rezende, S.Malenica, J.R.Fournier. *Advanced hydrodynamic analysis of LNG terminals*. 10th International Symposium on Practical Design of Ships and Other Floating Structures, Texas, ABS. 2007.

3. X.B.Chen. *Hydrodynamic analysis for offshore LNG terminals*. 2nd International Workshop on Applied Offshore Hydrodynamics, Brazil. 2005.

4. X.B.Chen. *Approximation on the quadratic transfer function of low-frequency loads*. Proceeding of 7th International Conference Behavior Offshore Structures. 1994; 2: p. 289 - 302.

5. X.B.Chen. *New formulations of the second-order wave loads*. Rapp. Technique, NT2840/DR/XC, Bureau Veritas, Paris, France. 2004.

6. X.B.Chen. *Hydrodynamics in offshore and naval applications*. 6th International Conference on Hydrodynamics, Perth, Australia. 2004.

7. X.B.Chen. *Offshore hydrodynamics and applications*. The IES Journal Part A: Civil & Structural Engineering. 2011; 4(3): p. 124 - 142.

8. H.Maruo. *The drift of a body floating on waves*. Journal of Ship Research. 1960; 4: p. 1 - 10.

9. Bernard Molin. *Second-order diffraction loads upon three-dimensional bodies*. Applied Ocean Research. 1979; 1(4): p. 197 - 202.

10. J.N.Newman. *The drift force and moment on ships in waves*. Journal of Ship Research. 1967; 11: p. 51 - 60.

11. J.N.Newman. *Second-order, slowly-varying forces on vessels in irregular waves*. Proceedings of the Symposium on the Dynamics of Marine Vehicles and Structures in Waves, London. 1974: p. 182 - 186.

12. J.N.Newman. *Progress in wave load computations on offshore structures*. 23rd OMAE Conference, Vancouver, Canada. 2004.

13. J.A.Pinkster. *Low frequency second order wave exciting forces on floating structures*. 1980.

14. J.A.Pinkster. *Low-frequency phenomena associated with vessels moored at sea*. Society Petroleum Engineers Journal. 1975; 15(6): p. 487 - 494.

15. Vietsovetro. *Environmental design criteria extreme conditions for the Bach Ho - Rong fields - South - East offshore Vietnam*. 2000.

16. Pham Hien Hau. *Estimation de la fiabilité du*

ystème d'ancrage des FPSO/FSOs au Vietnam, avec prise en compte de l'accumulation du dommage de fatigue. Thèse de Doctorat en Science de l'ingénieur. Université de Liège, Belgique. 2010.

17. Shell. *Prelude FLNG in numbers*. www.shell.com.au.
18. Chris Summers. *The gas platform that will be the world's biggest "ship"*. www.bbc.com. 15/7/2011.

Study of the hydrodynamic interaction of wave loads on the floating facility and the liquefied natural gas carrier during side-by-side offloading operation

Pham Hien Hau

National University of Civil Engineering

Summary

Liquefied Natural Gas Carrier (LNGC) is moored side-by-side to the Floating Liquefied Natural Gas facility (FLNG), the most effective and popular mooring method for obtaining the shortest way to transfer gas, and ensuring the frozen technology for liquefied gas at temperature of about -160°C. However this side-by-side offloading operation can create disadvantages for the FLNG facility and LNG carrier. This paper presents the theoretical and experimental studies of the hydrodynamic interaction of wave loads on two floating bodies with large dimension during side-by-side offloading operation.

The obtained study results were applied to Bach Ho field conditions using the HydroStar Software of French Bureau Veritas Register, in order to compare with the case of only one floating facility to evaluate the increase of the wave surface elevation in the gap between the FLNG and the LNGC. Finally, the interaction between the wave and the floating facility and tanker in the side-by-side mooring which causes adverse effects for the safety of the exploitation platform was concluded.

Key words: Hydrodynamic interaction, wave loads, floating liquefied natural gas facility, liquefied natural gas carrier, LNG, side-by-side offloading mooring, multiple-body simulations.