

NGHIÊN CỨU HIỆN TƯỢNG DAO ĐỘNG CHẤT LỎNG TRONG XE BỒN SỬ DỤNG PHƯƠNG PHÁP ĐỒNG MÔ PHÒNG

RESEARCH ON LIQUID SLOSHING EFFECT IN TANKER TRUCKS USING CO-SIMULATION

Phạm Duy Nam¹, Vũ Minh Quân¹, Nguyễn Hữu Mạnh², Nguyễn Thanh Tùng^{1,*}

¹Đại học Bách Khoa Hà Nội

²Trường Đại học Thành Đô (Hà Nội)

*Email: tung.nguyenthanh@hust.edu.vn

TÓM TẮT

Hiện tượng dao động chất lỏng trong xe bồn chở xăng dầu có thể gây mất ổn định động học, làm tăng nguy cơ mất ổn định và tai nạn, đồng thời tiềm ẩn nguy cơ gây ô nhiễm môi trường. Nghiên cứu này mô phỏng hiện tượng dao động chất lỏng trong xe bồn chở xăng dầu, sử dụng phương pháp đồng mô phỏng giữa Simcenter STAR-CCM+ và Simcenter Amesim. STAR-CCM+ được sử dụng để mô phỏng dòng chảy chất lỏng bằng phương pháp Volume of Fluid (VOF), trong khi Amesim mô hình hóa hệ thống cơ khí của xe, bao gồm hệ thống treo và chuyển động tổng thể của thân xe. Hai phần mềm trao đổi dữ liệu thời gian thực qua giao thức COSIM NETWORKS, với STAR-CCM+ cung cấp lực và moment từ dao động chất lỏng, còn Amesim cập nhật vị trí và vận tốc xe. Kết quả cho thấy ảnh hưởng của tốc độ lên độ ổn định xe khi đi qua đoạn đường mấp mô dạng sóng. Nghiên cứu khẳng định hiệu quả của đồng mô phỏng trong phân tích đa vật lý, hỗ trợ tối ưu trong việc đánh giá thiết kế xe bồn và nâng cao an toàn vận tải.

Từ khóa: Dao động chất lỏng; VOF; Động lực học; Mô phỏng số; Đồng mô phỏng.

ABSTRACT

This research investigates the fluid dynamic phenomena associated with the liquid sloshing effect within tanker trucks, which can induce instability during vehicular motion, thereby elevating the risk of accidents and environmental contamination. The study employs a coupled simulation methodology integrating Simcenter STAR-CCM+ and Simcenter Amesim through a co-simulation framework. STAR-CCM+ utilizes the Volume of Fluid (VOF) approach to model the free-surface flow of the liquid, while Amesim simulates the vehicle's mechanical subsystems, including suspension dynamics and overall kinematic behavior. Data exchange between the two environments is facilitated in real-time via the COSIM NETWORKS protocol, with STAR-CCM+ providing forces and moments generated by the liquid sloshing, which then fed to Amesim to update the vehicle's position and velocity. The simulation results show the impact of vehicle speed on stability characteristics during traversal of a sinusoidally varying road profile. The findings support the effectiveness of the co-simulation approach in multi-physics analysis, offering a robust framework for optimizing tanker truck design and enhancing transportation safety.

Keywords: Liquid sloshing; VOF; Dynamics; Numerical simulation; CO Simulation.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Dao động chất lỏng trong xe bồn chở chất lỏng (xăng, dầu) là nguyên nhân gây mất ổn định phương tiện, dẫn đến tai nạn giao thông và ô nhiễm môi trường nghiêm trọng tại Việt Nam. Trong điều kiện hạ tầng đường sá hạn chế, như mặt đường gồ ghề và khúc cua gắt trên Quốc lộ 1A, hiện tượng dao động chất lỏng làm tăng áp lực cục bộ lên thành bồn, gây dịch chuyển trọng tâm xe, đặc biệt nguy hiểm khi phanh gấp (0,4g) hoặc vào cua (0,3g). Hiện tượng này được cho là liên quan đến 12% sự cố mất ổn định xe bồn [1].

Ngày nay, mô phỏng số trở thành giải pháp cần thiết thay cho thử nghiệm thực tế vốn tốn kém và rủi ro, giúp phân tích hành vi chất lỏng và phản ứng hệ thống treo để tối ưu thiết kế xe bồn. Tuy nhiên, các nghiên cứu hiện có còn hạn chế. Trong nước, nghiên cứu của Phan Ngọc Diện (2024) [2] sử dụng Matlab/Simulink cho thấy mức chất lỏng 50-60% gây mất ổn định nghiêm trọng, nhưng chưa xét đến chất lỏng nhớt hay xe thương mại. Với các nghiên cứu quốc tế, các nghiên cứu tính toán động lực học chất lưu (CFD) như của Chaudhari (2021) và Younes & Younes (2015) [3], [4] cho thấy vách ngăn giúp giảm 80-90% lực sloshing, song đòi hỏi tài nguyên tính toán lớn và thiếu phân tích trong điều kiện thực tế. Nghiên cứu của Wasfy et al. (2008) [5] chỉ ra sai số 15-20% trong mô hình CFD – động lực học, còn Zheng et al. (2017) [6] đề xuất bồn elip để giảm dao động.

Để khắc phục các hạn chế trên, nghiên cứu đề xuất phương pháp đồng mô phỏng giữa Simcenter STAR-CCM+ và Simcenter Amesim. STAR-CCM+ mô phỏng dòng chảy chất lỏng bằng phương pháp VOF, trong khi Amesim phân tích động lực học hệ thống 1D gồm hệ thống treo, lốp và chuyển động tổng

thể. Hai phần mềm trao đổi dữ liệu theo thời gian thực qua COSIM NETWORKS, tạo nên mô hình đa vật lý toàn diện mô tả sự tương tác giữa chất lỏng và hệ cơ khí.

2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT

2.1. Mô hình động lực học chất lỏng

Việc mô phỏng trường vận tốc, phân bố áp suất qua việc sử dụng phần mềm STAR CCM+ được dựa trên các phương pháp tính toán CFD. Phương pháp này bao gồm các mô hình mô phỏng dòng chảy hai pha (VOF), Reynolds Averaged Navier Stoke (RANS).

2.1.1. Phương trình Navier-Stoke

Phương trình Navier-Stoke[7] là phương trình đặc trưng biểu diễn chuyển động của các phần tử chất lỏng trong không gian, phương trình đó được biểu diễn như sau:

$$\rho \frac{DV}{Dt} = \rho g - \nabla p + \mu \nabla^2 V \quad (1)$$

Cho từng chiều của vận tốc là $V(u,v,w)$:

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = \rho g_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (2)$$

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = \rho g_y - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad (3)$$

$$\rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = \rho g_z - \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad (4)$$

Trong đó: p là áp suất; u, v, w lần lượt là vận tốc theo các phương x, y, z .

2.1.2. Mô hình dòng chảy hai pha

Phương pháp VOF (Volume of Fluid) được sử dụng cho mô hình mô phỏng tương tác dòng chảy hai pha. Phương pháp này biểu diễn

tỉ lệ thể tích của mỗi pha trong một ô lưới, sau đó tính toán tích phân cho toàn miền mô phỏng. Phân bố của các pha và vị trí của chúng được biểu diễn bằng một trường hàm tỉ lệ thể tích α_i với mỗi liên hệ sau:

$$\alpha_i = \frac{V_i}{V} \quad (5)$$

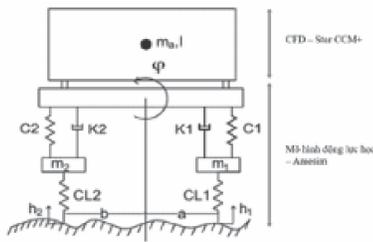
Trong đó, V_i là thể tích của pha i trong một ô lưới có thể tích là V . Tổng tỉ lệ thể tích của tất cả các pha trong cùng một ô lưới luôn bằng 1:

$$\sum_{i=1}^N \alpha_i = 1 \quad (6)$$

Trong đó, N là tổng số pha trong miền mô phỏng. Tùy vào từng giá trị của α_i mà chúng ta có thể nhận định lượng thể tích của pha đó trong một ô lưới xác định. Phương pháp VOF được trình bày chi tiết trong tài liệu [10].

2.2. Mô hình động lực học ô tô

Nghiên cứu sử dụng mô hình 1/2 xe để phân tích tác động của sloshing lên hệ thống treo và độ ổn định xe. Mô hình 1/2 xe xem xét chuyển động dọc (z) và chuyển động nghiêng (φ) của thân xe, với các thông số chính bao gồm khối lượng xe (m_x), khối lượng treo trước và sau (m_1, m_2), hệ số giảm chấn (K), độ cứng lò xo/lốp (C, CL), mô-men quán tính (I), độ mấp mô mặt đường (h_1, h_2) và khoảng cách từ cầu trước/sau đến tâm quay (a, b).



Hình 2. Mô hình động lực học dọc ô tô

Các phương trình động lực học được sử dụng bao gồm:

- Phương trình vi phân chuyển động thẳng đứng Oz:

$$\begin{cases} m_a \ddot{z} = F_C + F_K \\ m \ddot{\cdot} = F_{CL} - F_C - F_K \end{cases} \quad (7)$$

Trong đó:

$$\begin{cases} F_C = C \cdot (\xi - z) \\ F_K = K \cdot (\dot{\xi} - \dot{z}) \\ F_{CL} = C_L \cdot (h - \xi) \end{cases} \quad (8)$$

- Phương trình vi phân chuyển động của thân quanh trục Oy:

$$I \cdot \ddot{\varphi} = (F_{C2} + F_{K2}) \cdot b - (F_{C1} + F_{K1}) \cdot a \quad (9)$$

Các phương trình bao gồm vận tốc dọc của thân xe (\dot{z}), gia tốc dọc của thân xe (\ddot{z}), chuyển vị dọc của bánh xe (ξ), vận tốc dọc của bánh xe ($\dot{\xi}$), gia tốc dọc của bánh xe ($\ddot{\xi}$), lực lò xo tại hai trục (F_C), lực giảm chấn tại hai trục (F_K), lực giảm chấn từ mặt đường (F_{CL}), gia tốc góc quay ($\ddot{\varphi}$) [8].

3. MÔ HÌNH HÓA BÀI TOÁN

3.1. Thông số kỹ thuật

Bài toán giả định với xe có khối lượng bồn chứa được tính vào cùng với khối lượng thân xe, di chuyển đều với các dải vận tốc 30 km/h, 40 km/h và 50 km/h – vận tốc tối đa cho phép đi lại trong các tuyến phố hai chiều và một chiều có làn xe cơ giới [9]. Xe chạy ổn định trong thời gian 1s trước khi đi vào đoạn đường có mấp mô. Các thông số kỹ thuật của mô hình xe được trình bày trong bảng dưới đây:

Bảng 1. Thông số kỹ thuật của mô hình xe.

Thông số	Giá trị
m_a	2200 kg
m_1	570 kg
m_2	302 kg
a	2.25 m
b	2.25 m
I	8530 kg.m ²
C1,C2	235000 N/m
K1,K2	22260 N.s/m
CL1, CL2	293515 N/m

Lựa chọn thông số lớp 11.00R20 cho ra bán kính thiết kế của lốp là $R_u = 519$ mm, bán kính lốp chịu tải $R_l = 0.95 \times R_u = 493$ mm. Với vị trí ban đầu của tâm bánh xe nâng lên so với vị trí ban đầu một giá trị lớn hơn $\Delta R = R_u - R_l = 26$ mm, bánh xe sẽ không còn tiếp xúc với mặt đường.

Bài toán xét đến trường hợp xe di chuyển vào đoạn đường có biên dạng nhấp mô dạng Sin, đây là một dạng kích thích phổ biến được dùng trong nghiên cứu dao động động lực học xe. Phương trình dưới đây mô tả dạng kích thích này.

$$z_r(t) = H \sin\left(\frac{2\pi v}{L} t\right) \quad (10)$$

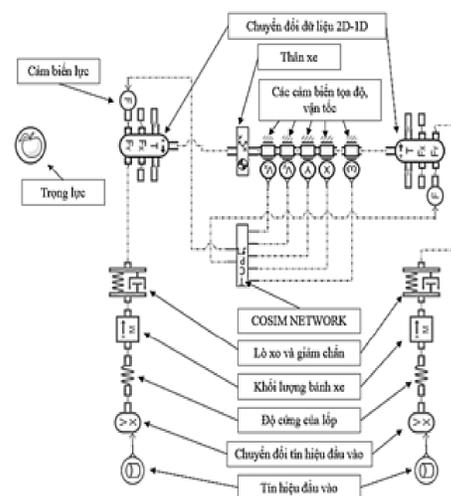
Trong đó: H là biên độ mặt đường (m); v là vận tốc của xe (m/s); và L là bước sóng của mặt đường (m).

Đối với mặt đường tại Việt Nam, có thể lấy $H = 10-20$ mm và $L = 1-2$ m. Trong mô phỏng này, biên độ mặt đường được chọn là $H = 15$ mm và bước sóng là $L = 1$ m.

3.2. Mô hình đồng mô phỏng Simcenter Amesim – Star-CCM+ [10]

Quy trình giữa Star-CCM+ và Amesim tích hợp mô phỏng CFD và động lực học hệ thống để phân tích sloshing trong xe bồn chở chất lỏng. Amesim xây dựng mô hình cơ học, tính toán chuyển động tuyến tính của hệ thống treo và khung xe, truyền dữ liệu qua server trung gian đến Star-CCM+. Star-CCM+ sử dụng phương pháp VOF để mô phỏng chính xác dao động chất lỏng, phân tích áp suất và lực tác động lên thành bồn trong các điều kiện như phanh gấp, vào cua. Lực chất lỏng từ Star-CCM+ được truyền ngược lại Amesim qua giao diện COSIM NETWORK, cập nhật mô hình động lực học xe. Quy trình này đòi hỏi thiết lập lưới tính toán, điều kiện biên và đồng bộ hóa dữ liệu cẩn thận để đảm bảo kết quả chính xác.

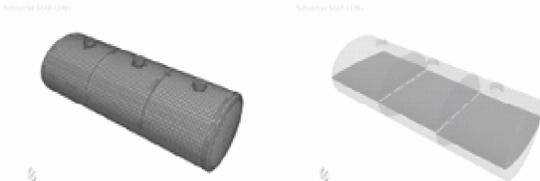
Mô hình Amesim sử dụng cách tiếp cận đa vật lý, tích hợp thư viện Planar Mechanical và Fluids Library để mô phỏng tương tác giữa chất lỏng và hệ thống treo.



Hình 3. Sơ đồ mô hình hệ thống treo trong Amesim

Mô hình bao gồm các thành phần chính: Thân xe Khối PLMDBOD0 từ Planar

Mechanical Library mô phỏng chuyển động hai chiều (gia tốc, góc quay) của thân xe dưới tác động của lực sloshing. Khối này chấp nhận lực tuyến tính và mô-men xoắn từ các công, với lực hấp dẫn định hướng dọc trục Y0 nối với khối PLMTO1D0 chuyển đổi tín hiệu từ hệ tọa độ 2D sang 1D, nối thân xe với hệ thống treo. Hệ thống treo bao gồm khối lò xo giảm chấn (SD0000A) và lò xo (SPR000A) để mô phỏng tính chất đàn hồi và giảm chấn. Khối MAS002 (Khối lượng bánh) mô phỏng chuyển động tuyến tính của bánh dưới tác động của lực ngoài được nối với khối XVLC01 chuyển tín hiệu đầu vào thành dịch chuyển tuyến tính, với vận tốc được xấp xỉ bởi phương pháp tử bậc nhất. Khối SIGUDA01 tín hiệu đầu vào, cho phép đưa vào dữ liệu mấp mô mặt đường theo thời gian, giúp tái hiện thực tế kích thích mặt đường lên hệ.

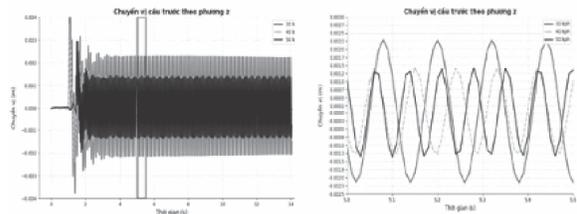


Hình 4. Chia lưới miền chất lỏng và biểu diễn điều kiện ban đầu với Star-CCM+ thực hiện tính toán CFD.

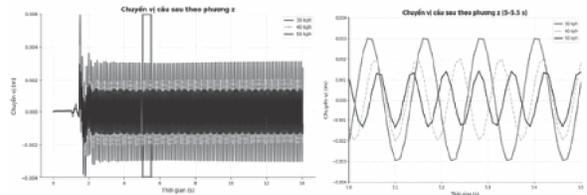
Đối với phương pháp đồng mô phỏng, Star CCM+ giải phân dao động chất lỏng với lượng chất lỏng 50%. Kích thước lưới cơ sở được chọn là 50 mm. Kết quả chia lưới với 116693 ô lưới, 349104 mặt lưới và 133909 điểm lưới; các vị trí biên được tạo các lớp lưới layer nhằm tái hiện chính xác hiện tượng chất lỏng va vào thành bồn. Lưới bề mặt và thể tích miền chất lỏng được hiển thị tại hình 4.

4. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

4.1. Chuyển vị tâm bánh xe



Hình 5. Chuyển vị tâm bánh xe cầu trước.



Hình 6. Chuyển vị tâm bánh xe cầu sau.

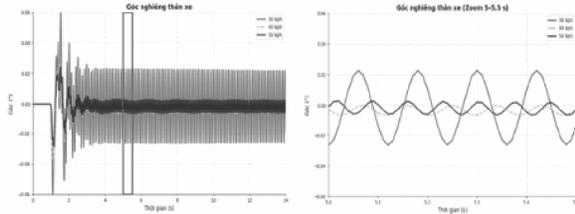
Thời điểm giây thứ 1, xe bắt đầu di chuyển vào đoạn đường mấp mô dạng sin và có kích thích dao động. Biên độ cực đại của chuyển vị tâm bánh xe so với vị trí tâm ban đầu với ba trường hợp xe di chuyển với vận tốc 30, 40, 50 km/h có xu hướng giảm dần, với cầu trước có giá trị lần lượt là 5.45, 3.69 và 2.79 mm; tương tự đối với cầu sau là 5.93, 4.07 và 2.95 mm. Khi vào giai đoạn ổn định, biên dao động cực đại có giá trị trung bình với bánh xe cầu trước của ba trường hợp lần lượt là 3.04, 2.02 và 1.36 mm; giá trị với bánh xe cầu sau là 2.26, 1.40 và 1.36 mm.

Kết quả cho thấy các giá trị tâm bánh xe bị nhấc lên so với vị trí ban đầu theo trục z luôn nhỏ hơn khoảng delta giữa bán kính thiết kế và bán kính trung bình của bánh xe. Từ đó, ta nhận thấy bánh xe vẫn có khả năng bám mặt đường tốt trong cả ba trường hợp chạy với vận tốc 30-50 km/h.

Xét một khoảng giá trị từ giây thứ 5 đến 5.5 trong khoảng dao động ổn định, giá trị cho thấy chu kỳ dao động của các trường hợp xe chạy với vận tốc 30, 40, 50 km/h có xu hướng giảm dần, với giá trị thu được từ cả cầu trước và

cầu sau lần lượt là xấp xỉ 0.12, 0.09 và 0.07 s. Từ đó cho thấy, với vận tốc càng lớn, tâm bánh xe dao động với tần số càng cao.

4.2. Góc quay thân xe



Hình 7. Góc nghiêng thân xe

Xét đến góc quay của thân xe theo trục y, giá trị đưa ra góc quay lớn nhất là tại thời điểm xe bắt đầu đi vào đoạn đường mấp mô, với các trường hợp chạy với vận tốc 30, 40, 50 km/h có giá trị lần lượt là -0.061° , -0.038° và -0.028° . Đến giai đoạn dao động ổn định, biên độ góc dao động trung bình có giá trị đỉnh lần lượt là 0.0228° , 0.0008° và 0.0030° . Giá trị này cho thấy trường hợp chạy với vận tốc 40 km/h cho ra trạng thái thân xe là ổn định nhất so với 50 km/h và với vận tốc 30 km/h là bất ổn định hơn. Tuy nhiên, các giá trị góc nghiêng thân xe này là không lớn nên gần như không gây mất cân bằng để tác động lên độ an toàn vận hành xe.

5. KẾT LUẬN

Nghiên cứu đã triển khai mô phỏng hiện tượng dao động chất lỏng trong xe bồn chở xăng dầu trong điều kiện mặt đường mấp mô của Việt Nam bằng phương pháp đồng mô phỏng giữa các nền tảng mô hình hóa chất lỏng và mô phỏng động lực học ô tô. Kết quả cho thấy phương pháp đồng mô phỏng tỏ ra vượt trội trong việc tái hiện các dao động phi tuyến và có khả năng tái hiện tương tác phức tạp giữa tương tác chất lỏng và mô hình động lực học xe, đặc biệt trong các điều kiện mặt đường

phức tạp như tại Việt Nam. Đây là cơ sở khoa học hỗ trợ thiết kế tối ưu xe bồn tại Việt Nam, đồng thời đóng góp vào định hướng xây dựng tiêu chuẩn kỹ thuật an toàn cho phương tiện vận chuyển chất lỏng nguy hiểm. ❖

Ngày nhận bài: **10/11/2025**

Ngày phản biện: **20/11/2025**

Tài liệu tham khảo:

- [1]. Tạp chí Giao thông vận tải, “*Thống kê sự cố mất ổn định của xe bồn tại Việt Nam*”, 58(3), pp. 15-20, 2022.
- [2]. P. N. Diện, “*Nghiên cứu khảo sát ngưỡng ổn định lật ngang của ô tô chở chất lỏng*”. Đồ án tốt nghiệp, Trường Đại học Giao thông vận tải, 2024.
- [3]. Chaudhari, A., “*CFD simulation of liquid sloshing in tank vehicles during braking*”. Journal of Fluid Dynamics, 45(3), pp. 123-135, 2021.
- [4]. Younes, M. F., & Younes, Y. K., “*Experimental investigation for liquid sloshing in baffled rectangular tanks*”. Journal of Mechanical Engineering Research, 7(4), pp. 45-58, 2015.
- [5]. Wasfy, T. M., O’Kins, J., & Smith, S., “*Experimental validation of a coupled fluid-multibody dynamics model for tanker trucks*”. SAE International Journal of Commercial Vehicles, 1(1), pp. 71-88, 2008.
- [6]. Zheng, X., et al., “*Numerical simulation of liquid sloshing in road tankers using CFD*”. International Journal of Automotive Technology, 13(5), pp. 789-798, 2012.
- [7]. Cebeci, T., Shao, J.P., Kafyeke, F., Laurendeau, E (2005), “*Computational Fluid Dynamics for Engineers*”. Horizon Publishing Inc. ISBN: 0-9766545-0-4.
- [8]. Lưu Văn Tuấn, “*Lý thuyết Ô tô*”. NXB. Giáo dục Việt Nam, 2019.
- [9]. Điều 6, Điều 7, Thông tư 31/2019/TT-BGTVT – Quy định về tốc độ và khoảng cách an toàn của xe cơ giới, xe máy chuyên dùng tham gia giao thông đường bộ.
- [10]. Volume of Fluid Method- Multiphase – Eulerian Approach- Theory- Siemens STAR-CCM+, Siemens 2023.