

Довжина збурення в двофазному потоці амміаку для горизонтального та висхідного потоку після дросельного отвору

*Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського
«Харківський авіаційний інститут»*

У статті наведені результати експериментальних досліджень режимів для двофазного потоку амміаку в прозорій кварцовій трубці з внутрішнім діаметром 7.5 мм та з розташованим в ній дросельним отвором з внутрішнім діаметром 2 мм в горизонтальному та вертикальному висхідному потоці. Експериментальні дані наведені для температури насичення від 35 до 55°C, масовій швидкості від 80 до 160 кг·м-2с-1 і масовому паровмісті від 0,1 до 0,7. Амміак було обрано тому що він має нульовий парниковий та озоноруйнуючий потенціал, а також найвищий гравіметричний коефіцієнт вмісту водню. Граничні умови було обрано згідно з перспективністю використання амміаку в якості робочого тіла не лише в холодильній техніці, а й в перспективних енергетичних установках, двигунах та системах забезпечення теплового режиму. В цьому випадку потрібні всебічні експериментальні дослідження в діапазоні температур холодного та гарячого джерела від 0 до 100 °C. В статті проведено аналіз опублікованих робіт та показана повна відсутність експериментальних досліджень по довжині збурення потоку не лише для амміаку, а й для HFC рідин при тиску вище за 7 бар. Це пов'язано зі складністю такого експерименту в зв'язку з дуже суворим вимогам до безпеки (основним недоліком амміаку є його токсичність). Використання амміаку у якості робочого тіла для перспективних енергетичних систем потребує більш детальне вивчення процесів пов'язаних, в тому числі, з двофазними режимами при різній орієнтації (горизонтальна та вертикальна) при високому тиску. В ході експериментальних досліджень виявлено та показано, що довжина збурення за дроселем не залежить від температури насичення, масової швидкості та масового паровмісту. Однак вона залежить від режиму двофазного потоку на вході. При обраних граничних умовах вперше показано що довжина збурення для горизонтального режиму не перевищує 23D відстані для стратифіковано-хвильового режиму і 15D для кільцевого та кільцево-хвильового. Пробковий та емульсійний режими дають довжину збурення 24D для вертикального висхідного потоку, тоді як кільцевий та кільцево-хвильовий режими можна вважати незмінними на відстані понад 20D. Також було проведено експеримент для кутового L-переходу і вперше візуально показано, що не демонструється ознак зміни режиму двофазного потоку на відстані вище 12D. Результати цього дослідження можуть бути корисними, дослідникам при розробці гідравлічних експериментів і експериментів з теплопередачі, щоб уникнути невизначеності, що виникає через вхідну частину та дроселюючі пристрої.

Ключові слова: амміак, двофазні режими, дросельний отвір.

Вступ

Двофазний режим течії в каналі встановлюється внаслідок впливу різних факторів. Це залежить від геометрії, властивостей рідини, температури насичення, масової швидкості, масового паровмісту, орієнтації, властивостей стінки, змочуваності, історії потоку тощо. Розрізнення моделей двофазного потоку дозволяє глибше зрозуміти та пояснити механізми пов'язані з дисипацією, сепарацією, кипінням і конденсацією. Також, це допомагає оптимізувати існуючі та майбутні інженерні системи.

Емпіричні та напівемпіричні карти двофазних режимів, такі як [1, 2, 3] широко прийняті для двофазних моделей у горизонтальних випадках. Однак,

будучи розробленими на основі експериментів повітря-вода та пара-вода, їх валідність повинна бути краще обґрунтована для інших рідин та граничних умов. Процес безперервної перевірки для різних HFC рідин виявив оновлені ітерації двофазних карт [4, 5]. Найточнішими картами двофазних режимів для вертикального потоку є карти представлені в роботах [6, 7].

Добре відомо, що будь-який місцевий опір в лінії повинен порушувати режим двофазного потоку. На певній відстані збурений двофазний потік знову стає повністю розвиненим із, швидше за все, тим же режимом. Надійне передбачення цієї відстані є важливим для оптимізації теплообмінників, дроселів і двофазних ліній. У двофазних дослідженнях розуміння повної відстані збурення потоку має важливе значення для адекватного планування експериментів, що стосуються локальних втрат тиску, коефіцієнта тепловіддачі при кипінні та конденсації та ін.

У недавньому дослідженні [8] запропонували короткий огляд експериментальної діяльності, що досліджує моделі двофазного потоку після місцевого опору, такого як дросельна заслінка, раптове розширення та звуження. Автори прийшли до висновку, що більшість досліджень використовували потік повітря-вода або повітря-масло як робочу рідину. Цей факт суттєво обмежує достовірність отриманих висновків щодо інших рідин і граничних умов. В роботі [9] показали, що 70D є достатньою відстанню в трубці з внутрішнім діаметром 7,9 мм, для повного розвинення двофазного потоку після раптового стиснення. Дослідження проводились для рідин R-134a та R-410A з відношенням площі поперечного перерізу (σ_A) 0,49. Ці дослідження були доповнені [8] випробуваннями R134a (+1,3% POE32) в прозорій трубці з внутрішнім діаметром 8 мм. В експерименті, після розширювального клапана, було показано, що відстань повного розвинення потоку може досягати 75D. Варто зазначити, що обидва дослідження проводились при відносно низькому тиску HFC рідини (<7 бар). При більш високому тиску ситуація може бути іншою через менший імпульс потоку парової фази. Можна припустити, що довжина збурення при більш високому тиску та для рідини з властивостями, відмінними від HFC, може різко відрізнятись. В роботі [10] не було виявлено якісної зміни поведінки локального коефіцієнта теплопередачі при конденсації в гладкій трубці з вхідною частиною, істотно нижче за 70D. Зважаючи на це було запропоновано провести дослідження з візуалізацією двофазного потоку в прозорій трубці з дросельним отвором. Аміак був обраний для випробувань як перспективна робоча рідина в системах охолодження та термоконтролю.

Для дослідження моделей двофазного потоку аміаку в горизонтальному і висхідному вертикальному потоці використовуються ті самі налаштування, засоби тестування та процедури, що й у роботі [11]. Тестова секція складається з довгої прозорої кварцової труби довжиною 1000 мм і внутрішнім діаметром 7,5 мм (рис. 1). Дросельний отвір з внутрішнім діаметром 2 мм було розміщено всередині трубки. Коефіцієнт площі поперечного перерізу (σ_A) дроселя становить 0,07. Опорна конструкція і гнучкі шланги випробувального стенду дозволяють змінювати орієнтацію прозорої трубки. Для зйомки потоку використовувалась камера (Nikon P510).

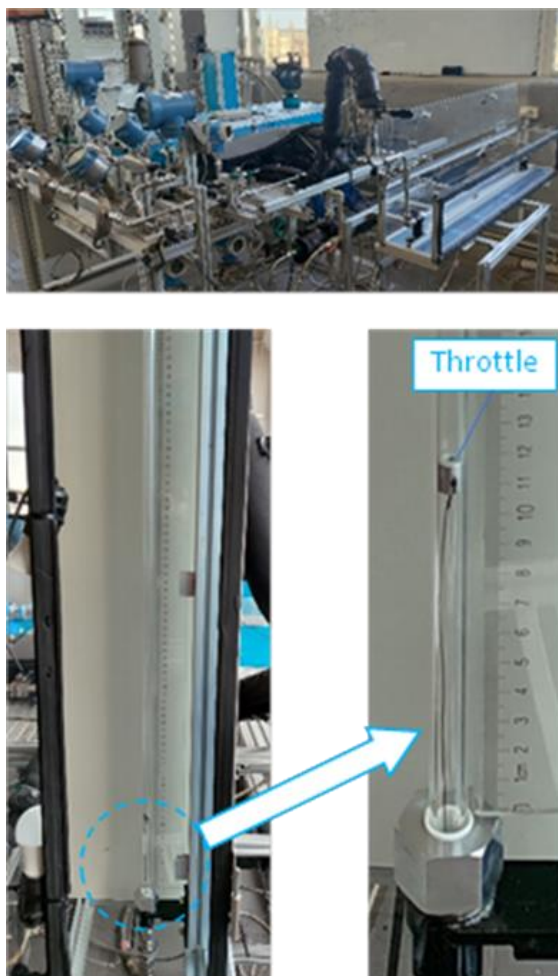


Рис. 1. Експериментальний стенд та прозора кварцова трубка з дроселем всередині

В таблиці 1 представлено граничні умови тестів. Внутрішній діаметр кварцової труби становить 7,5 мм і вимірюється з точністю $\pm 0,1$ мм. Загальна невизначеність вимірювання масової витрати $\pm 0,1$ % похибка масової швидкості (G) не перевищує ± 3 %. Похибка манометрів абсолютного тиску (± 5 кПа) призводить до максимальної невизначеності визначення температури насичення (T_s) $\pm 0,2^\circ\text{C}$ в діапазоні від 35 до 55°C . Невизначеність оцінки масового паровмісту на вході (x) становить $\pm 0,02$.

Таблиця 1

Граничні умови

Труба	Тиск (P), bar	Температура насичення ($T_s(P)$), $^\circ\text{C}$	Масовий паровміст на вході (x)	Масова швидкість (G), $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$	Орієнтація
ID 7.5 mm	13.5	35	0.1 до 0.7	80, 120, 160	горизонтальний, висхідний
	17.8	45	0.1 до 0.7	80, 120	горизонтальний
	23.1	55	0.1 до 0.7	80, 120	горизонтальний, висхідний

Результати експериментів

Експериментальні дослідження в горизонтальному потоці

На рис. 2 показані типові режими двофазного потоку, отримані для горизонтальної труби з дроселем. Кінець ділянки збурення позначається суб'єктивно, припускаючи, що далі картина якісно не змінюється. Для кожної випробувальної точки було оброблено щонайменше десять зображень режимів потоку з конкретною температурою насичення, масовою швидкістю та масовим паровмістом. Довжина збурення для стратифіковано-хвильового режиму (SW) більша, ніж для кільцево-хвильового (AW) і кільцевого режимів (A). Це логічно, оскільки картина SW спостерігається для випадків з низьким масовим паровмістом, що передбачає нерегулярну поведінку рідкої фази на вхід до дросельного отвору.

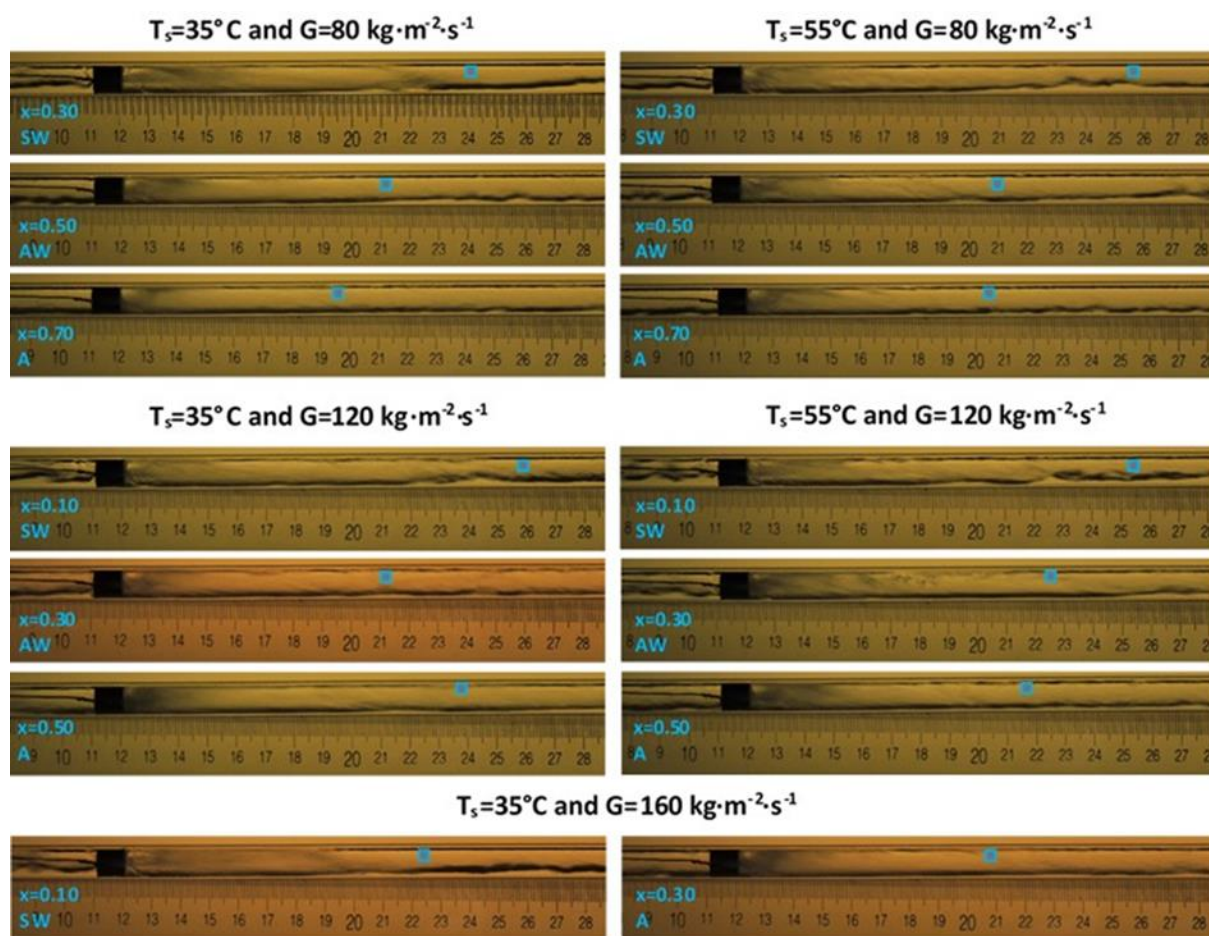


Рис. 2. Двофазні режими в горизонтальній кварцовій трубі з внутрішнім діаметром 7.5 мм та дроселем

На рис. 3 окремо показано розподіл ідентифікованих довжин збурень відносно до внутрішнього діаметру (L/D) для випадків SW та A/AW. Можна припустити, що при розглянутих граничних умовах довжина повністю розвинутого двофазного потоку може бути від 9 до 23D для стратифіковано-хвильового режиму та від 5 до 15D для кільцево-хвильового і кільцевого режимів. В ході експериментів вплив температури насичення, масового паровмісту та

масової швидкості не виявлено. Виявлена залежність від базового режим потоку. Отримані довжини збурень не відповідають наведеним даним іншими авторами для HFC рідин. Якісно, різні умови випробування ускладнюють прийти до будь-якого відповідного висновку при порівнянні результатів HFC рідин та аміаку. Порівняно з поточними умовами дослідження в роботі [9] випробували HFC рідини при масовій швидкості від 200 до 950 $\text{кг}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$ і оцінили кінець збурення за допомогою вимірювань падіння тиску з портами манометра, розташованими на дискретній відстані (15D, 30D, 70D і 100D). Цей метод дозволяє уникнути суб'єктивності, і покладається виключно на показання. Якщо бути точним, спостережувана довжина збурення в дослідженні [9] може бути від 30D до 70D. Враховуючи істотну різницю між граничними умовами та властивостями рідини, різниця між результатами для аміаку та HFC рідин не виглядає великою. Порівняння результатів цього дослідження з результатами, отриманими в роботі [8], є набагато менш інформативним, оскільки відбувається інтенсивне випаровування R134a у нижній лінії розширювального клапана. У цьому випадку визначена довжина збурення може бути набагато більшою, ніж у випадку простого раптового скорочення.

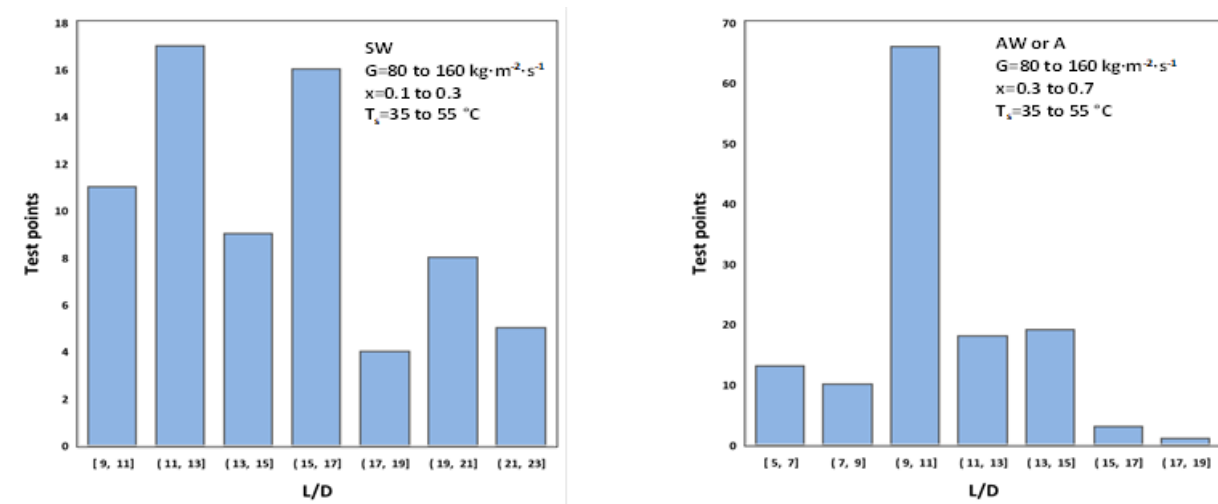


Рис. 3. Розподіл довжини збурення для аміаку в горизонтальному положенні

На відміну від загальноприйнятого уявлення про те, що повністю розвинену схему двофазного потоку слід очікувати на відстані, набагато більшій, ніж для однофазного випадку (безсумнівно, немає очевидного обґрунтування цього факту), в рамках цього дослідження було виявлено, що це може бути досить подібним до однофазного потоку, принаймні для аміаку в умовах високого тиску. Ідельчик [12] рекомендує наступний спосіб оцінки довжини для однофазного потоку в кільцевому каналі:

$$L = [3.28 \log Re - 4.35] D \quad (1)$$

де L – довжина, м; Re – число Рейнольдса; D – внутрішній діаметр

Таким чином, для рідкого потоку аміаку в трубі з внутрішнім діаметром 7,5 мм при 35 °C і масовій швидкості 80 $\text{кг}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$ очікується повний розвиток потоку на відстані $\approx 8D$, що значно нижче, ніж у двофазних випадках (рис. 3). Для потоку рідини R134a в трубі з внутрішнім діаметром 7,9 мм при 10 °C і 570 $\text{кг}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$ [9] це приблизно 10D.

Експериментальні дослідження в висхідному потоці

Горизонтальні випадки показали чітку залежність довжини двофазного збурення аміаку після дросельного отвору від режиму. Висхідна вертикальна течія характеризується різною особливістю двофазних структур, тому довжина збурення може бути різною. Рисунок 4 ілюструє типові шаблони в висхідному потоці. Для точок з низьким масовим паровмістом переважають пробковий (P) та емульсійний (C) режими.

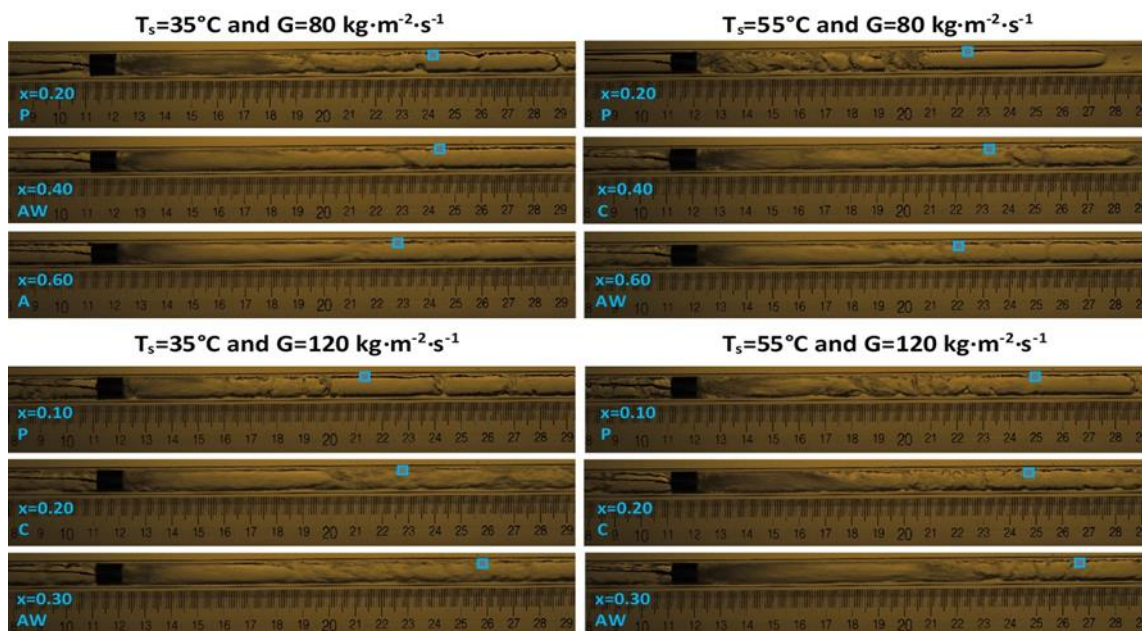


Рис. 4. Двофазні режими для висхідного потоку в кварцовій трубі з внутрішнім діаметром 7.5 мм та дроселем

На рис. 5 запропонований розподіл ідентифікованої довжини збурення для розглянутих випадків в висхідній течії. Таким чином, очікується наявність стабілізованої двофазної схеми потоку на відстані до 24D для пробкового та емульсійного режимів та 20D для кільцевого і кільцево-хвильового. Порівняно з даними горизонтального випробування, кільцевий режим встановлюється пізніше для вертикального висхідного потоку. У той же час, довжини збурень для інших режимів подібні.

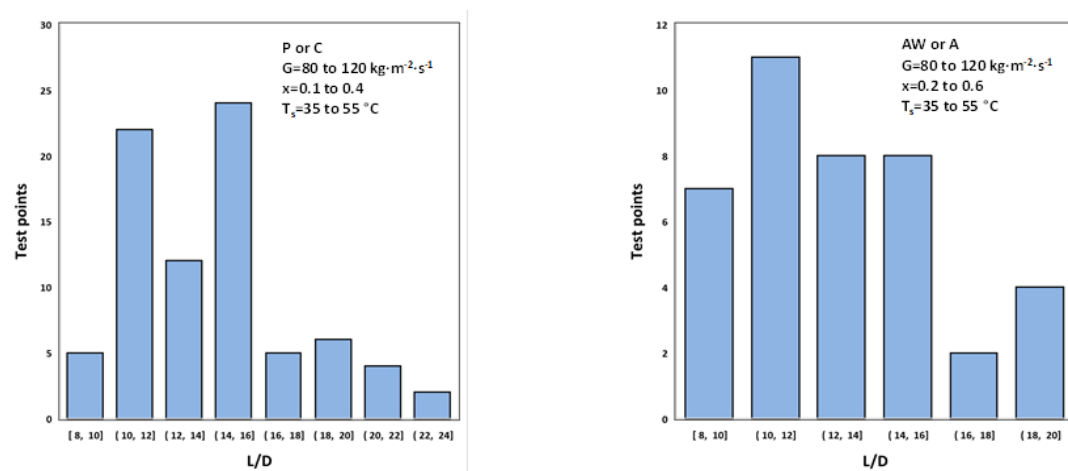


Рис. 5. Розподіл довжини збурення для аміаку в вертикальному положенні

Експериментальні дослідження з кутовим L-переходом на вході до кварцової трубки

Припускаючи, що різний місцевий опір може по-різному впливати на структуру двофазного потоку, були проведені короткі тести для потоку в трубі без дросельного отвору, але з використанням кутового L-переходу на вході до прозорої труби (рис. 6).



Рис. 6. Кварцова труба з кутовим L-переходом на вході

Взаємодіючі фази в кутовому L-переході зі зміною напрямку потоку можна вважати такими які мають вплив на двофазний потік. Відстань між кутовим переходом і прозорою кварцовою трубкою зі шкалою становить $12D$. На рисунку 7 показані типові зображення потоку в горизонтальному і висхідному випадках.

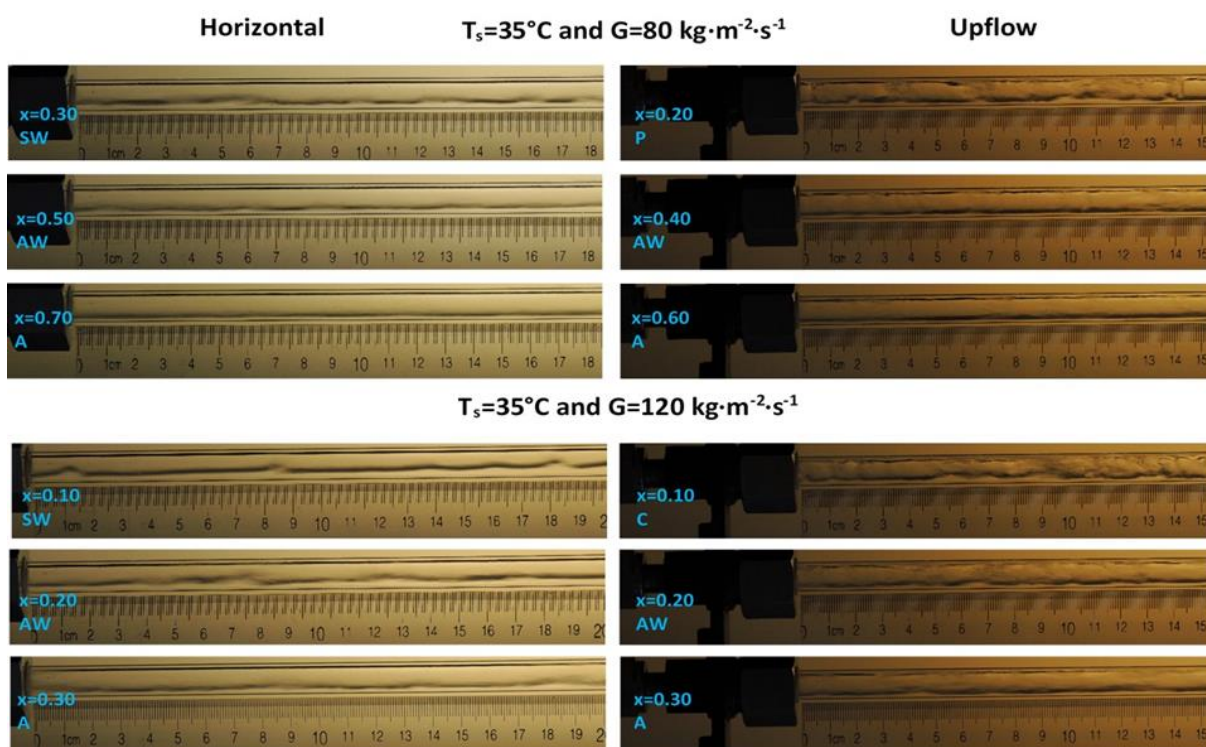


Рис. 7. Двофазні режими в кварцовій трубці з внутрішнім діаметром ID 7.5 mm для висхідного потоку та кутовим переходом на вході

Немає чітких доказів зміни двофазного режиму в прозорій частині трубки. Таким чином, можна зробити висновок, що довжина збурення після кутового переходу при розглянутих граничних умовах і орієнтації нижче $12D$. Проте слід визнати, що слабший місцевий опір може забезпечити слабшу реакцію на рівні збурень, яку важко ідентифікувати візуально. При цьому структура двофазного потоку якісно не змінюється, тобто вплив вхідної частини нижче $12D$ не повинен впливати на механізми кипіння та конденсації.

Висновки

В статі показана відсутність експериментальних досліджень по довжині збурення потоку для аміаку та HFC холодоагентів при тиску вище за 7 бар. Перш за все це пов'язано зі складністю такого експерименту – одним із основних недоліків аміаку є його токсичність. При експериментах з аміаком при високому тиску висуваються дуже суворі вимоги до безпеки експериментаторів. Спостереження двофазного потоку аміаку в кварцовій трубці з внутрішнім діаметром 7,5 мм та дросельним отвором з внутрішнім діаметром 2 мм дозволяють зробити наступні висновки. Ідентифікована довжина збурення не залежить від температури насичення, масової швидкості та масового паровмісту. Судячи з експериментальних досліджень є залежить від режиму двофазного потоку. Довжина збурення не перевищує відстань $23D$ в горизонтальному положенні для стратифіковано-хвильового режиму та $15D$ для кільцевого та кільцево-хвильового режимів. Пробковий та емульсійний режими дають довжину $24D$ збурення в вертикальному висхідному потоці, тоді як кільцевий та кільцево-хвильовий режими в висхідному потоці можна вважати незмінними на відстані понад $20D$. L-перехід як місцевий опір не демонструє ознак зміни режиму двофазного потоку на відстані вище $12D$. Оцінки довжини збурень у двофазному потоці аміаку значно вищі, ніж очікувані для однофазного (рідинного). Результати цього дослідження можуть бути корисними, перш за все, дослідникам при розробці гідравлічних експериментів і експериментів з теплопередачі, щоб уникнути невизначеності, що виникає через вхідну частину та дроселюючі пристрої. Вітається двофазні дослідження з іншими рідинами в подібних умовах, спрямовані на те, щоб отримати феноменологічні рекомендації щодо довжини збурення двофазного потоку через місцевий опір.

References

1. Baker, O. Multiphase Flow in Pipe Lines, Oil and Gas Journal, Nov. 10, 1958, 59, 156.
2. Bennett, A. W., Hewitt, G. F., Kearsey, H. A., Keays, R. K. F., Lacey, P. M. C. Flow visualisation studies of boiling at high pressure, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Conference Proceedings, Jun 1, 1965, – vol. 180, no. 3, pp. 260-283.
3. Taitel, Y. and Dukler, A. E. A model for predicting flow regime transitions in horizontal and near horizontal gas-liquid flow. AIChE journal, 1976, – vol. 22, no.1, pp. 47-55.
4. Kattan, N., Thome, J. R., Favrat, D. Flow Boiling in Horizontal Tubes: Part 1–Development of a Diabatic Two-Phase Flow Pattern Map. J. Heat Transfer, 1998, – vol. 120, – no. 1, pp. 140–147.
5. Wojtan, L., Ursenbacher, T., Thome, J. R. Investigation of flow boiling in

horizontal tubes: Part I – A new diabatic two-phase flow pattern map, International Journal of Heat and Mass Transfer, 2005, – vol. 48, pp. 2955–2969.

6. DOI: [10.1016/j.ijheatmasstransfer.2004.12.012](https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2004.12.012)

7. Hewitt, G. F. and Roberts, D. N. Studies of two-phase flow patterns by simultaneous x-ray and fast photography (No. AERE-M-2159). Atomic Energy Research Establishment, 1969, Harwell, England (United Kingdom).

8. Kaichiro, M., Ishii, M. Flow regime transition criteria for upward two-phase flow in vertical tubes, Int. J. Heat Mass Transfer, 1984, – vol. 27, issue 5, pp. 723–737.

9. Yao, Y., Hrnjak, P. Measurement and modeling of void fraction for developing two-phase flow of R134a in a horizontal tube after an expansion valve, Int. J. Refrigeration, 2023, vol. 154, pp. 125–137.

DOI: [10.1016/j.iirefrig.2023.07.009](https://doi.org/10.1016/j.iirefrig.2023.07.009)

10. Padilla, M., Revellin, R. and Bonjour, J. Two-phase flow of HFO-1234yf, R-134a and R-410A in sudden contractions: Visualization, pressure drop measurements and new prediction method, Experimental Thermal and Fluid Science, 2013, vol. 47, pp. 186–205. DOI: [10.1016/j.expthermflusci.2013.01.015](https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2013.01.015)

11. Ruzaiкин, V., Lukashov, I. and Breus, A. Ammonia condensation in the horizontal and vertical smooth tubes. Int. J. Refrigeration, 2024, vol. 164, pp 1–11.

DOI: [10.1016/j.iirefrig.2024.03.003](https://doi.org/10.1016/j.iirefrig.2024.03.003)

12. Ruzaiкин, V., Lukashov, I. and Breus, A. Ammonia single-phase and two-phase frictional pressure losses in horizontal smooth and straight inner-grooved tubes, Int. J. Refrigeration, 2024, vol. 161, pp. 124–134.

DOI: [10.1016/j.iirefrig.2024.02.029](https://doi.org/10.1016/j.iirefrig.2024.02.029)

13. Idelchik, I.E. Handbook of hydraulic resistance, Hemisphere Publishing, 1986, New York.

Надійшла до редакції 24.12.2024; розглянута на редколегії 24.12.2024

Perturbation length of ammonia two-phase flow in the horizontal and vertical lines with orifice throttle

The manuscript proposes the experimental study results dealing with the ammonia two-phase flow pattern observations in the horizontal and upflow transparent tube of ID 7.5 mm with the throttling orifice of ID 2 mm. The tests have been performed at a saturation temperature of 35 to 55°C, mass velocity of 80 to 160 kg•m-2s-1 and vapour quality of 0.1 to 0.7. Ammonia was chosen because it has zero greenhouse and ozone depleting potential, as well as the highest gravimetric coefficient of hydrogen content. The boundary conditions were chosen in accordance with the perspective of using ammonia as a working fluid not only in refrigeration equipment, but also in promising power plants, engines and systems for providing a warm regime. In this case, comprehensive experimental studies are required in the range of cold and hot source temperatures from 0 to 100 °C. The article analyzes the published works and shows the complete lack of experimental studies on the length of the flow disturbance not only for ammonia, but also for HFC liquids at pressures above 7 bar. This is due to the complexity of such an experiment due to very strict safety requirements (the main disadvantage of ammonia is its toxicity). The use of ammonia as a working medium for promising energy systems requires a more detailed study of the processes associated with, including, two-phase regimes at different orientations

(horizontal and vertical) at high pressure. In the course of experimental studies, it was found and shown that the length of the perturbation behind the throttle does not depend on the saturation temperature, mass velocity, and mass vapor content. However, it depends on the two-phase flow regime at the inlet. Under the selected boundary conditions, it is shown for the first time that the perturbation length does not exceed the 23D distance of the horizontal line for the stratified-wavy pattern and 15D for the annular and annular-wavy flows. Plug and churn patterns give 24D perturbation length of the upflow line, while annular and annular-wavy patterns could be considered unchangeable at a distance of above 20D. The L-junction as a singularity does not show evidence of two-phase flow pattern change at a distance above 12D. The results of this study can be useful to researchers in the design of hydraulic and heat transfer experiments to avoid uncertainties arising from inlet and choke devices.

Keywords: ammonia, two-phase flow, pattern, throttle

Відомості про автора

Іван Миколайович Лукашов – асистент кафедри теоретичної механіки, машинознавства та роботомеханічних систем, Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут» м. Харків, Україна; e-mail: i.lukashov@khai.edu, ORCID: 0009-0005-3864-279

About the Author

Ivan Lukashov – assistant, Department of Theoretical Mechanics, Engineering and Robotic Systems, National Aerospace University “Kharkiv Aviation Institute”, Kharkiv, Ukraine, e-mail: i.lukashov@khai.edu, ORCID: 0009-0005-3864-279