

УДК 004.9:621.6

Н.Л. ДОРОШ
Національна металургійна академія України

МОДЕЛЮВАННЯ КОНДЕНСАЦІЇ СТРУМЕНЯ ПАРИ КИСНЮ У РІДИНІ КИСНЮ

Представлені результати чисельних розрахунків довжини області конденсації струменя газоподібного кисню в потоці рідкого кисню.

Конденсація струменя перегрітої пари низькотемпературного середовища має свої особливості в порівнянні з конденсацією струменя водяної пари. При моделюванні течій різних середовищ можуть бути використані наступні безрозмірні параметри і критерії: відношення щільності рідини і пари, відношення швидкості рідини і пари, критерій фазового переходу. Температура газоподібного кисню може бути істотно вище температури насичення, це призводить до відмінності умов конденсації.

Використано дані експериментальних досліджень з візуалізацією процесу конденсації струменя газоподібного кисню в потоці рідкого кисню, а саме, фотографії, на яких показано взаємодію струменя газоподібного кисню з потоком рідкого кисню. На фотографіях область конденсації, переважно, має форму факела. В ранніх дослідженнях струменевої конденсації водяної пари у воді струмінь має форму конуса.

В результаті узагальнення експериментальних даних отримана формула для визначення довжини області конденсації. Безрозмірна довжина області конденсації є нелінійною функцією безрозмірних параметрів: відношення швидкостей рідкого і газоподібного кисню і критерію фазового переходу. У результаті застосування методів нелінійного регресійного аналізу уточнені значення параметрів для функції, за якою визначається довжина області конденсації газоподібного кисню в потоці рідкого кисню. Було обчислено середньоквадратичне відхилення експериментальних даних від теоретичних даних, які розраховувалися за аналітичною залежністю з двома комплектами значень параметрів: новими та запропонованими в роботі [2]. Проведено порівняльний аналіз точності побудованих апроксимуючих функцій. Нова функція є більш точною і може бути використана для математичного моделювання динаміки насосної системи рідинного ракетного двигуна.

Ключові слова: конденсація; струмінь газоподібного кисню; потік рідкого кисню; довжина області конденсації; критерій фазового переходу; швидкість газоподібного кисню; швидкість рідкого кисню; узагальнення експериментальних даних; регресійний аналіз.

Н.Л. ДОРОШ
Национальная металлургическая академия Украины

МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНДЕНСАЦИИ СТРУИ ПАРА КИСЛОРОДА В ЖИДКОМ КИСЛОРОДЕ

Представлены результаты численных расчетов длины области конденсации струи газообразного кислорода в потоке жидкого кислорода.

Конденсация струи перегретого пара низкотемпературной среды имеет свои особенности по сравнению с конденсацией струи водяного пара. При моделировании течений различных сред могут быть использованы следующие безразмерные параметры и критерии: отношение плотностей жидкости и пара, отношение скоростей жидкости и пара, критерий фазового перехода. Температура

газообразного кислорода может быть существенно выше температуры насыщения, это приводит к отличию условий конденсации.

Использованы данные экспериментальных исследований с визуализацией процесса конденсации струи газообразного кислорода в потоке жидкого кислорода, а именно, фотографии, на которых показано взаимодействие струи газообразного кислорода с потоком жидкого кислорода. На фотографиях область конденсации, преимущественно, имеет форму факела. В ранних исследованиях струйной конденсации водяного пара в воде струя имеет форму конуса.

В результате обобщения экспериментальных данных получена формула для определения длины области конденсации. Безразмерная длина области конденсации является нелинейной функцией безразмерных параметров: отношения скоростей жидкого и газообразного кислорода и критерия фазового перехода. В результате применения методов нелинейного регрессионного анализа уточнены значения параметров для функции, с помощью которой определяется длина области конденсации газообразного кислорода в потоке жидкого кислорода. Были вычислены среднеквадратические отклонения экспериментальных данных от теоретических данных, которые рассчитывались на основе аналитической зависимости с двумя комплектами значений параметров: новыми и предложенными в работе [2]. Выполнен сравнительный анализ точности построенных аппроксимирующих функций. Новая функция является более точной и может быть использована для математического моделирования динамики насосной системы жидкостного ракетного двигателя.

Ключевые слова: конденсация; струя газообразного кислорода; поток жидкого кислорода; длина области конденсации; критерий фазового перехода; скорость газообразного кислорода; скорость жидкого кислорода; обобщение экспериментальных данных; регрессионный анализ.

N.L. DOROSH

National Metallurgical Academy of Ukraine

SIMULATION OF OXYGEN STEAM JET CONDENSATION IN LIQUID OXYGEN

The results of numerical calculations of the length of the condensation region of a gaseous oxygen jet in a liquid oxygen flow are presented.

Condensation of superheated steam jet of a low-temperature substances has its own characteristics in comparison with condensation of a water vapor jet. When modeling flows of various substances, the following dimensionless parameters and criteria can be used: density ratio of liquid and vapor, velocity ratio liquid to vapor, and the phase transition criterion. The oxygen gas temperature can be significantly higher than the saturation temperature, which leads to different condensation conditions.

Experimental data with visualization of the condensation process of a stream of gaseous oxygen in a stream of liquid oxygen, namely, photographs are used. In the photographs, the condensation area is predominantly in the shape of a torch; in the early studies of jet condensation of water vapor in water, the jet was shaped like a cone.

As a result of generalization of the experimental data, a formula was obtained for determining the length of the condensation region. As a result of applying the methods of nonlinear regression analysis, the values of the parameters for the function, which are used to determine the length of the condensation region of gaseous oxygen in the flow of liquid oxygen, have been refined. We calculated the standard deviations of the experimental data from the theoretical data, which were obtained on the basis of an analytical dependence with two sets of parameter values: new and proposed in [2]. Comparative analysis of the accuracy

of the constructed approximating functions is carried out. New function is more accurate and can be used for mathematical modeling of the dynamics of the pumping system of a liquid propellant rocket engine.

Keywords: condensation; gaseous oxygen stream; liquid oxygen flow; length of the condensation region; phase transition criterion; oxygen gas velocity; liquid oxygen velocity; generalization of experimental data; regression analysis

Постановка проблеми

Конденсація струменя пари в рідині має місце в захисних системах первинних контурів парогенераторів, в підігрівачах прямого контакту, в системах живлення двигунів космічних апаратів, які працюють на екологічно чистому паливі. Практичний інтерес представляє визначення області конденсації пари, часу і швидкості конденсації. Наприклад, можливою причиною зниження власної частоти коливань рідини в насосній системі подачі палива ракетного двигуна може бути наявність газоподібного кисню через неповну його конденсацію [1].

Конденсація струменя перегрітої пари низькотемпературного середовища має особливості в порівнянні з конденсацією струменя водяної пари.

Широко відомі методи розрахунку течії, яка реалізована при взаємодії водяної пари з водою. У традиційному підході розглядається початкова ділянка струменя, де пара повністю конденсується, а границя розділу рідкої і парової фаз має форму, яка близька конусної. Температура розділу фаз є відомою і дорівнює температурі насичення водяної пари. Вказані задачі розв'язують методами теорії пограничного шару. Визначають параметри течії і розмір «конуса конденсації», тобто області конденсації. При конденсації кисню в умовах роботи рідинного ракетного двигуна конвективний струм тепла «пар-рідина» істотно перевищує теплоту фазового переходу, відбувається нерівноважний процес конденсації. Температура і форма границі розділу фаз є невідомими. Моделювання досліджуваного процесу конденсації ускладнюється.

У роботі [2] наведені результати експериментальних досліджень струминної конденсації газоподібного кисню у рідині кисню, які були використані при моделюванні струминної конденсації пари кисню у потоці рідкого кисню.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Різноманіття завдань і складність процесу призвели до появи великої кількості робіт з експериментального та теоретичного дослідження струминної конденсації. Більшість робіт присвячені питанням конденсації насиченої пари води у воді. Однак не можна сказати, що процеси конденсації струменя пари в рідині досліджені досить повно. Автори робіт [3–4] при моделюванні двофазної течії використовують той факт, що струмінь конденсується повністю на гладкій границі розділу фаз, що існує між паром і рідиною. Автори публікації [5] допускають можливість взаємопроникнення фаз.

Одним з основних параметрів тепломасопереносу двофазного потоку, що виникає при взаємодії струменя пари з рідиною, є довжина області поширення пари до повної її конденсації або довжина струменя. Одним з перших довжину струменя водяної пари у воді визначив Глікман Б.Ф. [3]. На підставі його теоретичних і експериментальних досліджень був зроблений висновок, що струмінь водяної пари конденсується на відстані, яка дорівнює калібру отвору вдуву пари, а границя розділу фаз має форму конуса. Ці результати частково підтвердилися в дослідженні [4]. Але встановлено, що діапазон значень довжини струменя пари в рідині суттєво ширший і може приймати значення 0,5-30 калібрів отвору вдуву пари.

Важливу роль при моделюванні течій має теорія подібності [6]. Звичайно, результати розрахунку довжини струменя водяної пари можуть бути використані в задачі конденсації струменя газоподібного кисню в потоці рідкого кисню при дотриманні умов моделювання течій. Практично у всіх роботах використовуються такі безрозмірні параметри і критерії: відношення щільності рідини і пари, відношення швидкостей рідини і пари, критерій фазового переходу [7]. Але температура газоподібного кисню може бути істотно вище температури насичення, це призводить до істотної відмінності умов конденсації. Таким чином, визначення довжини і форми області конденсації при взаємодії струменя газоподібного кисню і рідини кисню представляє як практичний, так і теоретичний інтерес.

Мета дослідження

Метою роботи є узагальнення результатів експериментальних даних з конденсації струменя пари кисню у рідині кисню, які пов'язані з визначенням форми та розмірів області конденсації.

Викладення основного матеріалу дослідження

Експериментальні дослідження парорідини, яка є результатом вдуву струменя газоподібного кисню в потік рідкого кисню, надані в роботі [2].

До складу установки для проведення експериментальних досліджень входить прозорий трубопровід для спостереження вдуву газоподібного кисню в рідину кисню. Наявність прозорої частини дозволяє проводити візуальні дослідження рідини з використанням фотографування. Температура рідкого кисню на вході в прозору ділянку становить 90–113 К; температура газоподібного кисню – 290 К, максимальний тиск в прозорій ділянці складає 0,5 МПа.

В результаті експериментальних досліджень одержані фотографії, на яких зафіксований момент вдуву газоподібного кисню в рідкий кисень при різних параметрах: тиску і температури. На основі цих фотографій стає можливим ретельне вивчення взаємодії струменя кисню з рідиною кисню, а саме, процес конденсації.

Як приклад, на рис. 1 представлено фотографію потоку кисню, у який проведено вдув газоподібного кисню. У верхній частині фотографії розташований електронний секундомір-таймер, за допомогою якого відбувається прив'язка до параметрів газоподібного кисню та рідини кисню. З фотографії видно, що пара до конденсації має форму струменя (факельна форма). Інтерес представляє розмір області конденсації.

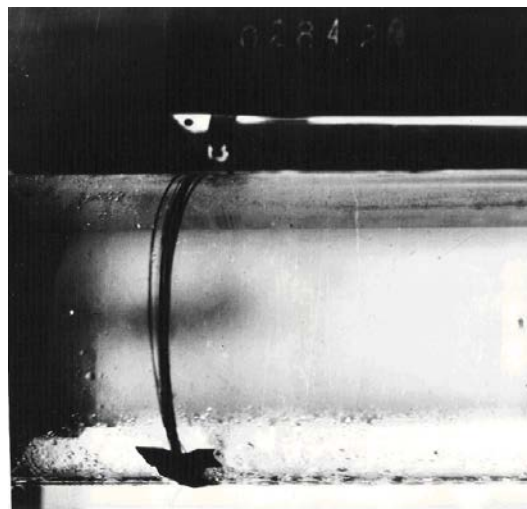


Рис. 1. Фото вдуву газоподібного кисню у рідину кисню.

Довжина області конденсації визначається безпосереднім вимірюванням.

Коефіцієнт масштабування обчислено за розміром зовнішньої оболонки трубопроводу.

Для характеристики двофазного потоку, який виникає при вдуві пари в рідину, використовують параметри: W_v , м/с – швидкість пари; W_l , м/с – швидкість рідини; T_l , К – температура рідини; P_s , МПа – тиск на лінії насичення; T_s , К – температура на лінії насичення.

Найважливіше значення для розв’язання задачі струминної конденсації набувають методи дослідження, що використовують теорію подібності. В існуючих моделях струминної конденсації використовувалися параметри α , γ і K_l [8].

Тобто при взаємодії струменя пари з рідиною, визначаються: параметр швидкості α , параметр щільності γ , критерій фазового переходу K_l :

$$\alpha = \frac{w_l}{w_v}; \quad (1)$$

$$\gamma = \frac{\rho_l}{\rho_v}; \quad (2)$$

$$K_l = \frac{r}{c_l(T_s - T_l)}; \quad (3)$$

де w_l , w_v – швидкість рідини та пари, ρ_l , ρ_v – щільність рідини та пари, c_l – питома теплоємність рідини, r – теплота пароутворення, T_s – температура насичення, T_l – температура рідини.

Вид формули для узагальнення даних з довжини області конденсації збережено відповідно до роботи [2]:

$$\frac{l}{d_0} = C\alpha^n K_l^m, \quad (4)$$

де l – довжина області конденсації, d_0 – діаметр отвору вдуву пари кисню; C , n , m – невідомі коефіцієнти.

Виконаємо лінеаризацію залежності (4) шляхом логарифмування обох частин рівності [9]:

$$\ln \frac{l}{d_0} = \ln C + n \ln \alpha + m \ln K_l \quad (5)$$

Значення параметрів: $\ln C$, n , m – у формулі (5) розраховуються за стандартними алгоритмом регресійного аналізу для лінійних залежностей [9].

В результаті аналітична залежність для визначення довжини області конденсації газоподібного кисню у потоці рідкого кисню має вигляд:

$$\frac{l}{d_0} = 0.01379 \alpha^{-0.5865} K_l^{1.0257}. \quad (6)$$

Формула (6) отримана в наступному діапазоні зміни параметрів: $\alpha=0,04 - 0,19$; $K_l=9 - 30$.

На рис. 2 представлений графік поверхні, яка відповідає отриманій нелінійній регресії (6), в координатах α і K_l , а також відзначені похибки експериментальних даних. Похибки, що мають від'ємні значення, виділені синім кольором. Похибки, що мають додатні значення, виділені червоним кольором.

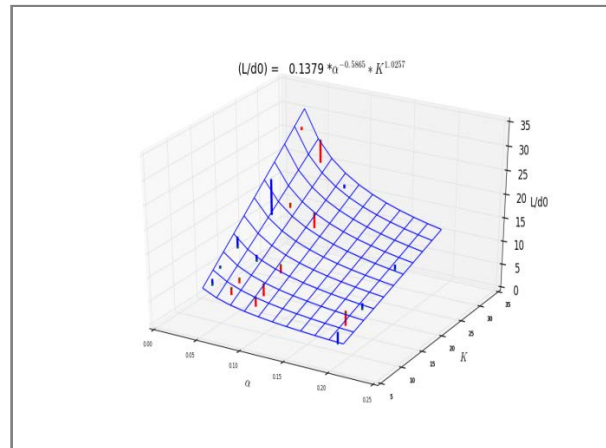


Рис. 2. Графік залежності (6).

В попередніх дослідженнях струминної конденсації пари кисню в рідині кисню запропоновано формулу для обчислення довжини області конденсації [2]:

$$\frac{L}{d_0} = 0.013 \alpha^{-0.7} K_l^{1.67} \quad (7).$$

Середньоквадратичне відхилення похибок для залежності (7) становить 3,707, а для залежності (6) – 2,347. Очевидно, що формула (6) з уточненими значеннями параметрів має кращу точність.

У роботах [1, 10] розрахунок піддатливості області неконденсованого кисню проведено на підставі результатів отриманих в роботі [2]. Використання формули (6) дозволяє підвищити точність цих розрахунків.

Висновки

Проведено аналіз зображень двофазного потоку кисню, які отримані з експериментального дослідження парорідинної течії при вдві газоподібного кисню у потік рідкого кисню. Встановлено, що струмінь має форму факелу.

Уточнено значення параметрів у формулі для обчислення довжини області конденсації кисню у рідині кисню порівняно з роботою [2].

Список використаної літератури

1. Пилипенко О. В., Прокопчук А. А., Долгополов С. И., Писаренко В. Ю., Коваленко В. Н., Николаев А. Д., Хоряк Н. В. Особенности математического моделирования низкочастотной динамики маршевого ЖРД с дожиганием генераторного газа при запуске. *Космична наука і технологія*. 2017. Т. 23, № 5. С. 3–12. DOI: 10.15407/knit2017.05.003.

2. Пилипенко В. В., Дорош Н. Л., Манько И. К. Экспериментальное исследование конденсации пара при вдуве струи газообразного кислорода в поток жидкого кислорода. *Техническая механика*. 1993. Вып. 2. С. 77–80.
3. Гликман Б. Ф. О конденсации струи пара в пространстве, заполненном жидкостью. *Известия АН СССР*. 1957. № 2. С. 43–49.
4. Накоряков В. Е., Сафарова Н. С. Простая формула для определения положения поверхности раздела фаз при конденсации затопленной струи пара. *Известия СО АН СССР. Серия техн. наук*. 1975. Т. 8. № 2. С. 69–71.
5. Kudo A., Eguso T., Toda S. Basic Study on Vapor Suppression. *Proceedings of the 5th International Heat Transfer Conference (Tokyo, 1974)*. Vol. 3. P. 221–225.
6. Ісаченко В. Н., Осипова В. А., Сукомел А. С. Теплопередача. М.: Энергоиздат, 1981. 416 с.
7. Акуличев В. Л., Алексеев В. Н., Буланов В. А. Периодические фазовые превращения в жидкостях. М.: Наука, 1988. 280 с.
8. Кутателадзе С. С., Накоряков В. Е. Тепломассообмен и волны в газожидкостных системах. Новосибирск. Наука, Сиб. Отделение АН СССР, 1984. 302 с.
9. Сигел Э. Практическая бизнес-статистика: Пер. с англ. М.: Издательский дом «Вильямс», 2008. 1056с.
10. Пилипенко О. В., Долгополов С. І., Ніколаєв О. Д., Хоряк Н. В. Математическое моделирование запуска многодвигательной жидкостной ракетной двигательной установки. *Технічна механіка*. 2020. №1. С. 5–18. DOI: 10.15407/itm2020.01.005.

References

1. Pilipenko, O. V., Prokopchuk, A. A., Dolgoplov, S. I., Pisarenko, V. Yu., Kovalenko, V. N., Nikolaev, A. D., & Horyak, N. V. (2017). Osobennosti matematicheskogo modelirovaniya nizkochastotnoy dinamiki marshevogo ZhRD s dozhiganiem generatornogo gaza pri zapuske. *Kosmichna nauka i tehnologiya*. **23**, 5, 3–12. DOI: 10.15407/knit2017.05.003.
2. Pilipenko, V. V., Dorosh, N. L., & Manko, I. K. (1993). Eksperimentalnoe issledovanie kondensatsii para pri vduve strui gazoobraznogo kisloroda v potok zhidkogo kisloroda. *Tekhnicheskaya mehanika*. **2**, 77–80.
3. Glikman, B. F. (1957). O kondensatsii strui para v prostranstve, zapolnennom zhidkostyu. *Izvestia AN SSSR*. **2**, 43–49.
4. Nakoryakov, V. E., & Safarova, N. S. (1975). Prostaya formula dlya opredeleniya polozheniya poverhnosti razdela faz pri kondensatsii zatoplennoy strui para. *Izvestia SO AN SSSR. Seria tehn.nauk*. **8**, 2, 69–71.
5. Kudo, A., Eguso, T., & Toda, S. (1974). Basic Study on Vapor Suppression. *Proceedings of the 5th International Heat Transfer Conference*. Vol. 3. (Tokyo, 1974), pp. 221–225.
6. Isachenko, V. N., Osipova, V. A., & Sukomel, A. S. (1981). *Teploperedacha*. М.: Energoizdat.
7. Akulichhev, V. L., Alekseev, V. N., & Bulanov, V. A. (1988). *Periodicheskie fazovyye prevrascheniya v zhidkostyah*. М.: Nauka
8. Kutateladze, S. S., & Nakoryakov, V. E. (1984). *Teplomassoobmen i volnyi v gazozhidkostnyih sistemah*. Novosibirsk. Nauka, Sib. Otdelenie ANSSSR.
9. Sigel, E. (2008). *Prakticheskaya biznes-statistika*.: Per. s angl. М.: Izdatelskiy dom «Vilyams».
10. Pilipenko, O. V., Dolgoplov, S. I., Nikolaev, O. D., & Horyak, N. V. (2020). Matematicheskoe modelirovanie zapuska mnogodvigatelnoy zhidkostnoy raketnoy dvigatelnoy ustanovki. *Tekhnichna mehanika*. **1**, 5–18. DOI: 10.15407/itm2020.01.005.

Дорош Наталія Леонідівна – к.т.н., доцент, доцент кафедри інформаційних технологій та систем Національної металургійної академії України (м. Дніпро), e-mail: natalidorosh53@gmail.com, ORCID: 0000-0003-4184-3648.