

ОСОБЕННОСТИ СПОНТАННОЙ КОНДЕНСАЦИИ ОКСИДА БОРА В ПЛОСКИХ И ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ СОПЛАХ: ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ*

А. М. Савельев¹, Д. И. Бабушенко², В. А. Савельева³

Аннотация: Разработана модель спонтанной конденсации паров оксида бора в химически реагирующих газовых смесях, базирующаяся на классической теории нуклеации (КТН) и односкоростном и одно-температурном приближении для уравнений движения двухфазной смеси. Модель учитывает процессы нуклеации, конденсационного роста капель, их коагуляцию и газофазные химические реакции. Выполнено численное исследование спонтанной конденсации паров оксида бора в плоских и осесимметричных соплах. Показано, что в плоских соплах с небольшой степенью расширения процесс конденсации протекает по типичному сценарию: образование скачка конденсации за горлом сопла и конденсационный рост капель ниже по течению за скачком. В геометрически подобных плоских соплах с небольшой степенью расширения положение скачка конденсации не зависит от линейных размеров сопла. Важной особенностью спонтанной конденсации в соплах с небольшой степенью расширения является равновесие пара и конденсата в выходном сечении сопла. В соплах с большой степенью расширения фазовое равновесие не достигается. Степень отклонения от равновесия в соплах такого типа тем значительнее, чем больше угол раскрытия сверхзвуковой части сопла.

Ключевые слова: оксид бора; конденсация; нуклеация; сопло; моделирование

DOI: 10.30826/CE22150306

EDN: JDYUJO

Литература

1. Grabis J., Rašmane D., Krūmiņa A., Patmalnieks A. Preparation of boron suboxide nanoparticles and their processing // *Mater. Sci.*, 2012. Vol. 18. P. 72–74.
2. Tzierkezos N. G., Ritter U., Thaha Y. N., Downing C. Application of multi-walled carbon nanotubes modified with boron oxide nanoparticles in electrochemistry // *Ionic*, 2015. Vol. 21. P. 3087–3095.
3. Ramachandran R., Jung D., Bernier N. A., Logan J. K., Waddington M. A., Spokoyny A. M. Sonochemical synthesis of small boron oxide nanoparticles // *Inorg. Chem.*, 2018. Vol. 57. P. 8037–8041.
4. Бернер М. К., Зарко В. Е., Талавар М. Б. Наночастицы энергетических материалов: способы получения и свойства (обзор) // *Физика горения и взрыва*, 2013. Т. 49. № 6. С. 3–30.
5. Savel'ev A. M., Starik A. M. An improved model of homogeneous nucleation for high supersaturation conditions: Aluminum vapor // *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 2017. Vol. 19. P. 523–538.
6. Суздалев И. П. Нанотехнология, физико-химия нанокластеров, наноструктур и наноматериалов. — М.: КомКнига, 2006. 592 с.
7. Савельев А. М., Бабушенко Д. И., Копчёнов В. И., Титова Н. С. Численное исследование гомогенной нуклеации паров оксида бора в соплах Лавалья // *Физика горения и взрыва*, 2021. Т. 57. № 1. С. 34–50. doi: 10.15372/FGV20210104.
8. Gany A. Comprehensive consideration of boron combustion in airbreathing propulsion. AIAA Paper No. 2006-4567, 2006.
9. Haddad A., Natan B., Arieli R. The performance of a boron-loaded gel-fuel ramjet // *Progress in propulsion physics* / Eds. L. T. DeLuca, C. Bonnal, O. Haidn, S. M. Frolov. — EUCASS advances in aerospace sciences book ser. — EDP Sciences — TORUS PRESS, 2011. Vol. 2. P. 499–518.
10. Balas S., Natan B. Boron oxide condensation in a hydrocarbon–boron gel fuel ramjet // *J. Propul. Power*, 2016. Vol. 32. P. 967–974.
11. Tower L. K. Thermal relations for two-phase expansion with phase equilibrium and example for combustion products of boron-containing fuel. — Lewis Flight Propulsion Laboratory, 1961. NACA RM E57C11.
12. Kortsenshteyn N. M., Yastrebov A. K. Interphase heat transfer during bulk condensation in the flow of vapor–gas mixture // *Int. J. Heat Mass Tran.*, 2012. Vol. 55. P. 1133–1140.
13. Аветисян А. Р., Алипченков В. М., Зайчик Л. И. Моделирование течений спонтанно конденсирующегося влажного пара в соплах Лавалья // *Теплофизика высоких температур*, 2002. Т. 40. № 6. С. 938–946.

*Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 20-08-00299-а).

¹ЦИАМ им. П. И. Баранова, amsavelev@ciam.ru

²ЦИАМ им. П. И. Баранова, dibabushenko@ciam.ru

³ЦИАМ им. П. И. Баранова, vasaveleva@ciam.ru

14. Френкель Я. И. Кинетическая теория жидкостей. — Л.: Наука, 1975. 592 с.
15. Старик А. М., Савельев А. М. Динамика образования сульфатных аэрозолей в струях реактивных двигателей // Известия РАН. Механика жидкости и газа, 2001. № 1. С. 108–117.
16. Савельев А. М. Образование ультрадисперсных заряженных и нейтральных аэрозолей в элементах проточного тракта и выхлопной струе турбореактивного двигателя: Дис. . . . канд. техн. наук. — М., 2010. 180 с.
17. Савельев А. М., Старик А. М. О механизмах коагуляции заряженных наночастиц, образующихся при горении углеводородных и металлизированных топлив // ЖЭТФ, 2009. Т. 135. Вып. 2. С. 369–384.
18. Chase M. W. NIST-JANAF Thermochemical Tables. — 4th ed. — 1998.
19. Shpil'rain E. E., Yakimovich K. A., Tsitsarkin A. F. Investigation of the surface tension of liquid boron oxide to 2000 °C by the cylinder pulling method // High Temp. — High Press., 1972. Vol. 4. P. 67–76.
20. Шпильраин Э. Э., Якимович К. А., Цицаркин А. Ф. Поверхностное натяжение жидкой окиси бора при температурах до 2100 °C // Теплофизика высоких температур, 1974. Т. 12. № 1. С. 77–82.
21. Fujino S., Wang H., Morinaga K. Surface tension of PbO–B₂O₃ and Bi₂O₃–B₂O₃ glass melts // J. Mater. Sci., 2005. Vol. 40. P. 7–12.
22. Shi X., Wang Q., Niu X., Li C., Lu K. An examination of surface tension of binary lithium borate melts as a function of composition and temperature // J. Am. Ceram. Soc., 2006. Vol. 89. P. 3222–3228.
23. Болдырев А. С., Гасилов В. А., Зайчик Л. И., Ольховская О. Г. Численное моделирование квазиодномерных и двумерных течений спонтанно конденсирующегося пара в трансзвуковых соплах // Теплофизика высоких температур, 1998. Т. 36. С. 135–140.
24. Дейч М. Е., Филиппов Г. А. Газодинамика двухфазных сред. — М.: Энергия, 1968. 423 с.
25. Ткаленко Р. А. Конденсация паров воды в плоских и осесимметричных соплах // Известия АН СССР. Механика жидкости и газа, 1972. № 6. С. 159–162.
26. Стернин Л. Е. Основы газодинамика двухфазных течений в соплах. — М.: Машиностроение, 1974. 212 с.
27. Корценштейн Н. М., Самуйлов Е. В. Образование аэрозольной плазмы в процессе объемной конденсации в облаке продуктов приземного взрыва // Теплофизика высоких температур, 2005. Т. 43. Вып. 5. С. 666–676.

Поступила в редакцию 08.06.2022