

ТЕРМИЧЕСКОЕ И КАЛОРИЧЕСКОЕ УРАВНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ АЗОТА В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ ПЛОТНОСТИ И ТЕМПЕРАТУРЫ: ПРИМЕНЕНИЕ К РАСЧЕТАМ ИСТЕЧЕНИЯ КРИОГЕННЫХ СТРУЙ*

Н. М. Кузнецов¹, С. Н. Медведев², С. М. Фролов³, Ф. С. Фролов⁴, Б. Басара⁵, К. Пахлер⁶

Аннотация: Разработано аналитическое уравнение состояния (УрС) реального газа для азота. Проведена проверка области применимости УрС в широком диапазоне плотности (от 0 до значения в тройной точке) и температуры (от 100 до 5000 К). Полученное УрС внедрено в газодинамическую программу для расчета многомерных турбулентных реагирующих течений. С использованием нового УрС проведены расчеты истечения плотной затопленной турбулентной струи криогенного азота в камеру, заполненную азотом при нормальной температуре. Проведено сравнение результатов расчетов с экспериментальными данными по изменению плотности вещества в струе. Получено удовлетворительное согласие результатов. Разработанное УрС позволяет разделять области жидкости и газа по локальным мгновенным значениям плотности и температуры в струе без применения модели двухфазного течения.

Ключевые слова: азот; реальный газ; широкодиапазонное уравнение состояния; тройная точка; криогенная струя; распределение плотности

DOI: 10.30826/CE20130213

Литература

1. Handbook of atomization and sprays: Theory and applications / Ed. N. Ashgriz. — New York, NY, USA: Springer, 2011. 951 p. doi: 10.1007/978-1-4419-7264-4.
2. Oschwald M., Smith J. J., Branam R., Hussong J., Schik A., Chehrودي B., Talley D. Injection of fluids into supercritical environments // Combust. Sci. Technol., 2006. Vol. 178. No. 1-3. P. 49–100. doi: 10.1080/00102200500292464.
3. Mayer W., Tellar J., Branam R., Schneider G., Hussong J. Raman measurement of cryogenic injection at supercritical pressure // Heat Mass Transfer, 2003. Vol. 39. P. 709–719.
4. Chehrودي B., Talley D. Fractal geometry of a cryogenic nitrogen round jet injected into sub- and super-critical conditions // Atomization Spray, 2004. Vol. 14. P. 81–91.
5. Zong N., Yang V. Cryogenic fluid jets and mixing layers in transcritical and supercritical environments // Combust. Sci. Technol., 2006. Vol. 178. P. 193–227. doi: 10.1080/00102200500287613.
6. Peng D. Y., Robinson D. P. A new two-constant equation of state // Ind. Eng. Chem. Fund., 1976. Vol. 15. No. 1. P. 59–64. doi: 10.1026/1160057a011.
7. Jarczyk M., Pitznery M. Large eddy simulation of supercritical nitrogen jets. AIAA Paper No. 2012-1270, 2012.
8. Ries F., Obando P., Shevchuck I., Janicka J., Sadiki A. Numerical analysis of turbulent flow dynamics and heat transport in a round jet at supercritical conditions // Int. J. Heat Fluid Fl., 2017. Vol. 66. P. 172–184. doi: 10.1016/j.ijheatfluidflow.2017.06.007.
9. Sierra-Pallares J., Garcia del Valle J., Garcia-Carrascal P., Castro Ruiz F. Numerical study of supercritical and transcritical injection using different turbulent Prandtl numbers: A second law analysis // J. Supercrit. Fluid., 2016. Vol. 115. P. 86–98. doi: 10.1016/j.supflu.2016.05.001.

*Работа выполнена за счет субсидии, выделенной ФИЦ ХФ РАН на выполнение государственного задания по теме 0082-2016-0011 (номер государственной регистрации AAAA-A17-117040610346-5), и субсидии, выделенной ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН по теме 0065-2019-0005 (номер государственной регистрации AAAA-A19-119011590092-6).

¹Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук, N-M-Kuznetsov@yandex.ru

²Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук, medvedevs@chph.ras.ru

³Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук; Федеральный научный центр Научно-исследовательский институт системных исследований Российской академии наук, Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, smfrol@chph.ras.ru

⁴Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук, f.frolov@chph.ru

⁵АВЛ Лист ГмбХ, branislav.basara@avl.com

⁶АВЛ Лист ГмбХ, klaus.pachler@avl.com

10. Фролов С. М., Кузнецов Н. М., Крюгер С. Свойства реальных газов — н-алканов, O_2 , N_2 , H_2O , CO , CO_2 и H_2 в условиях эксплуатации дизельного двигателя // Ж. сверхкритические флюиды: Теория и практика, 2009. Т. 4. № 3. С. 56–105; Т. 4. № 4. С. 3–60.
11. Кузнецов Н. М., Дубровский А. В., Фролов С. М. Аналитическая аппроксимация термических и калорических уравнений состояния реальных газов в широком диапазоне плотности и температуры // Сверхкритические флюиды: Теория и практика, 2011. Т. 6. № 1. С. 25–52.
12. Кузнецов Н. М., Дубровский А. В., Фролов С. М. Аналитическая аппроксимация уравнений состояния реальных газов в расширенном диапазоне давления и плотности // Горение и взрыв, 2011. Вып. 4. С. 68–74.
13. Кузнецов Н. М. Двухфазная смесь вода–пар. Уравнение состояния, скорость звука, изэнтропы // Докл. Акад. наук СССР, 1981. Т. 257. № 4. С. 858.
14. Кузнецов Н. М. Уравнение состояния и кривая фазового равновесия систем жидкость–пар // Докл. Акад. наук СССР, 1982. Т. 266. № 3. С. 613.
15. Кузнецов Н. М., Александров Е. Н., Давыдова О. Н. Аналитическое представление кривых фазового равновесия жидкость–пар для насыщенных углеводородов // Теплофизика высоких температур, 2002. Т. 40. № 3. С. 395.
16. Варгафтик Н. Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. — М.: Физматгиз, 1963. 708 с.
17. Span R., Lemmon E. W., Jacobsen R. T., Wagner W., Yokozeki A. A reference equation of state for the thermodynamic properties of nitrogen for temperatures from 63.151 to 1000 K and pressures to 2200 MPa // J. Phys. Chem. Ref. Data, 2000. Vol. 29. No. 6. P. 1361–1433.
18. Abudour A. M., Mohammad S. A., Robinson R. L., Jr., Gaseem K. A. M. Volume-translated Peng–Robinson equation of state for saturated and single-phase liquid densities // Fluid Phase Equilib., 2012. Vol. 335. P. 74–87. doi: 10.1016/j.fluid.2012.08.013.
19. AVL FIREr — Computational Fluid Dynamics for Conventional and Alternative Powertrain Development. <https://www.avl.com/fire>.
20. Lemmon E. W., Jacobsen R. T. Viscosity and thermal conductivity equations for nitrogen, oxygen, argon, and air // Int. J. Thermophys., 2004. Vol. 25. No. 1. P. 21–69.
21. Фролов С. М., Иванов В. С., Тухватулина Р. Р., Фролов Ф. С., Кузнецов Н. М., Басара Б. Расчет рабочего процесса в дизеле с уравнением состояния реального газа // Горение и взрыв, 2019. Т. 12. № 1. С. 73–83. doi: 10.30826/CE19120109.
22. Hanjalic K., Popovac M., Hadziabdic M. A robust nearwall elliptic relaxation eddy-viscosity turbulence model for CFD // Int. J. Heat Fluid Fl., 2004. Vol. 25. P. 897–901.
23. Ferziger J. H., Peric M. Computational methods for fluid dynamics. — New York, NY, USA: Springer-Verlag, 1996. 370 p.
24. Sweby P. K. High resolution schemes using flux limiters for hyperbolic conservation laws // SIAM J. Numer. Anal., 1984. Vol. 21. No. 5. P. 995. doi: 10.1137/0721062.
25. Lemmon E. W., McLinden M. O., Friend D. G. Thermophysical properties of fluid systems // NIST Chemistry WebBook, NIST Standard Reference Database Number 69 / Eds. P. J. Linstrom, W. G. Mallard. — Gaithersburg, MD, USA: National Institute of Standards and Technology. <https://doi.org/10.18434/T4D303>.

Поступила в редакцию 12.03.2020