## О ВЫБОРЕ УРАВНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ РЕАЛЬНОГО ГАЗА ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ В ЖРД И В ДИЗЕЛЬНОМ ДВИГАТЕЛЕ

Белов Г.В.

*Объединенный институт высоких температур РАН, Россия,* ***125412, Москва, ул. Ижорская, д.13, стр.2,*** *e-mail: gbelov@yandex.ru*

*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова. Россия.*

*119991, Москва, Ленинские горы, дом 1, строение 3, ГСП-1, МГУ, химический факультет.*

Вычислительные методы гидрогазодинамики (Computational fluid dynamics) все шире применяются для моделирования процессов течения газов и жидкостей. При этом достоверность результатов вычислений существенным образом зависит от качества модели. До сих пор во многих случаях для описания газовой фазы применяется уравнение состояния идеального газа. Однако возможны ситуации, когда такое допущение может привести к существенным ошибкам. В частности, большой практический интерес представляет задача моделирования процесса впрыска топлива в камеру сгорания ЖРД и в цилиндр дизельного двигателя. Особенностью этого процесса является то, что впрыск осуществляется в области параметров, отвечающей сверхкритическому состоянию топлива. При этом возможна ситуация, когда силы поверхностного натяжения флюида уменьшаются и течение жидкости становится аномальным [1]. Для описания *p*-*V*-*T* свойств в этих условиях применяют обычно либо кубическое уравнение состояния типа Редлиха-Квонга, Пенга-Робинсона или модифицированной уравнение Бенедикта-Вебба-Рубина (мБВР) [2]. В качестве уравнения состояния мБВР в большинстве работ, посвященных данной тематике, выбирается уравнение состояния азота, предложенное в [3]. При этом, азот выступает в качестве вещества сравнения, а для вычисления свойств флюида используется расширенный принцип соответственных состояний, предложенный в [4]. Если рабочее тело представляет собой смесь веществ, то для расчета ее свойств рекомендуется использовать правила смешения, описанные в [5].

Сравнительно недавно для описания свойств углеводородов было предложено использовать коллекцию уравнений состояния вириального типа [6,7]. Данный подход представляется неудобным, поскольку для его применения нужно знать уравнение состояния каждого компонента смеси. Кроме того, предлагаемый авторами статьи способ определения параметров смеси реальных газов может привести к существенным погрешностям при расчете ее свойств.

В работе [8] приводится анализ возможностей использования нескольких уравнений состояния кубического типа для моделирования процессов горения в ЖРД. Авторы сравнили результаты расчетов, получаемые с использованием уравнений Соаве-Редлиха-Квонга, Пенга-Робинсона и уравнения RK-PR, предложенного в [9]. По мнению авторов [8] уравнение состояния RK-PR наилучшим образом описывает имеющиеся данные о свойствах кислорода и трехкомпонентного суррогатного топлива, которое моделирует поведение керосина.

В рамках нашего исследования было проведено сравнение возможностей описания уравнений состояния RK-PR и мБВР для описания свойств углеводородов в сверхкритической области. Установлено, что в широком диапазоне параметров кубическое уравнение состояния с приемлемой точностью (не хуже 5%) описывает экспериментальные *p-V-T* данные. Однако в окрестности критической точки, видимо, часто целесообразно использовать более точное уравнение состояния типа мБВР.

Работа выполнена при финансовой поддержке по Программе  
фундаментальных исследований ПРАН по стратегическим направлениям развития науки  №1 "Фундаментальные проблемы математического моделирования" (коорд. ак. Бетелин В.Б.).

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Rainer N. Dahms, Julien Manin, Lyle M. Pickett, Joseph C. Oefelein Understanding high-pressure gas-liquid interface phenomena in Diesel engines. *Proceedings of the Combustion Institute* **34** (2013) 1667–1675.
2. J. C. Oefelein, T. G. Drozda and V. Sankaran Large eddy simulation of turbulence-chemistry interactions in reacting flows. *Journal of Physics: Conference Series* **46** (2006) 16–27.
3. Jacobsen, R. T., and Stewart, R. B. J., Thermodynamic Properties of Nitrogen Including Liquid and Vapor Phases from63 K to 2000 K with Pressures to 10,000 Bar. *Journal Phys. Chem. Ref. Data* **2** (1973) 757–922.
4. J. S. Rowlinson and I. D. Watson. The prediction of the thermodynamic properties of fluids and fluid mixtures–I. The principle of corresponding states and its extensions. *Chem. Eng. Sci*., **24** (1969) 1565–1574.
5. Рид Р., Праусниц Дж., Шервуд Т. *Свойства газов и жидкостей*. — Л.: Химия, 1982. — 592 с.
6. Фролов С.М., Кузнецов Н.М., Крюгер С. Свойства реальных газов – н-алканов, O2, N2, H2O, CO, CO2 и H2 в условиях эксплуатации дизельного двигателя. *Ж. Сверхкритические флюиды: Теория и практика*. 2009, Том **4**, № 3, с. 56-105.
7. Фролов С.М., Кузнецов Н.М., Крюгер С. Свойства реальных газов – н-алканов, O2, N2, H2O, CO, CO2 и H2 в условиях эксплуатации дизельного двигателя. *Ж. Сверхкритические флюиды: Теория и практика*. 2009, Том **4**, № 4, с. 3-60.
8. Seong-Ku Kim, Hwan-Seok Choi, Yongmo Kim Thermodynamic modeling based on a generalized cubic equation of state for kerosene/LOx rocket combustion. *Combustion and Flame* **159** (2012) 1351–1365.
9. M. Cismondi, J. Mollerup Development and application of a three-parameter RK–PR equation of state. *Fluid Phase Equilibria* **232** (2005) 74–89