

# Оценка применимости различных уравнений состояния реального газа для этилена

Н.В. Кукшинов<sup>1,2</sup>, Д.Л. Мамышев<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ФГУП «ЦИАМ им. П.И. Баранова», 111116, Москва, Российская Федерация, Авиамоторная ул., д. 2

<sup>2</sup> МГТУ им. Н.Э. Баумана, 105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1

## Evaluation of the Applicability of Different Equations of State of the Real Gas for Ethylene

N.V. Kukshinov<sup>1,2</sup>, D.L. Mamyshev<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Federal State Unitary Enterprise Baranov Central Institute of Aviation Motors CIAM, 111116, Moscow, Russian Federation, Aviamotornaya St., Bldg. 2

<sup>2</sup> BMSTU, 105005, Moscow, Russian Federation, 2<sup>nd</sup> Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1



e-mail: kukshinov@ciam.ru, mr.dmitry.dq.1234@gmail.com



Приведена методика определения зависимостей теплофизических свойств этилена от давления и температуры. Зависимости получены с использованием уравнений состояния реального газа Ли–Кеслера, Ли–Эрбара–Эдмистера, Редлиха–Квонга и вириального уравнения. Показаны границы применимости уравнений состояния реального газа для определения теплофизических свойств этилена в широких диапазонах давлений и температур. Построены графики зависимостей плотности и теплоемкости от температуры при изменении давления в интервале 0,1...20 МПа. Рассчитаны суммарные относительные погрешности определения плотности и теплоемкости этилена по уравнению Ли–Кеслера.

**Ключевые слова:** уравнения состояния, теплофизические свойства этилена, реальный газ, сверхкритическая область



The paper presents a technique for obtaining the dependencies of the thermophysical properties of ethylene on the pressure and temperature. The dependencies were obtained using Lee–Kesler, Lee–Erbar–Edmister, Redlich–Kwong equations of state and the virial equation for the real gas. The limits of applicability of the equations of state of the real gas for determining thermophysical properties of ethylene over a wide range of pressure and temperature values are shown. Graphs showing the dependences of the density and heat capacity on the temperature with a pressure change in the range from 0.1 to 20 MPa are presented. The total relative errors in the determination of the density and heat capacity of ethylene are calculated using the Lee–Kesler equation.

**Keywords:** equations of state, thermophysical properties of ethylene, real gas, supercritical area

Известно большое число уравнений состояния (УС) реального газа [1]. Эти уравнения претендуют на универсальность, хотя для каждого вещества необходимо валидировать полученные с их помощью результаты по данным, найденным экспериментальным путем или с использованием вириальных уравнений, коэффициен-

ты которых определены специально для исследуемого вещества.

Цель работы — рассмотрение применимости УС реального газа Редлиха–Квонга (РК), Ли–Эрбара–Эдмистера (ЛЭЭ) и Ли–Кеслера (ЛК) для получения теплофизических свойств этилена.

Этилен (C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>) можно применять в качестве рабочего тела в силовых установках. Математическую модель течения в проточных трактах для этилена построить проще, чем для керосинов, поэтому его используют в задачах валидации расчетных методов [2, 3]. Чтобы определить течение этилена в различных проточных трактах, необходимо знать УС и зависимости теплоемкости от давления и температуры в широких диапазонах изменяемых параметров. Для осуществления этой цели созданы коммерческие и многофункциональные программы [4], в которых можно рассчитывать как предельные углеводороды, так и топливные смеси. Ввиду сложности интеграции с гидродинамическими пакетами актуальность использования УС как инструмента для оценки свойств определенных углеводородов остается высокой.

Существуют двух-, трех- и четырехконстантные УС разных степеней [1, 5–8]. Так, в работе [9] приведен не только обзор кубических УС, но и сравнение значений, найденных с их помощью, с некоторыми расчетными данными, полученными при анализе изменения структуры вещества. Вопросы разработки УС реального газа по-прежнему являются актуальными. Например, в работе [10] представлено новое УС для предельных углеводородов и изучено влияние молекулярной структуры на сжимаемость.

В основе многих УС лежит модель соответственных состояний. В частности, в статье [11] предложена трехпараметрическая модель соответственных состояний на базе двух эталонных веществ — метана и углекислого газа. С ее помощью результаты получались точнее, чем с использованием уравнения ЛК, но для веществ с высоким коэффициентом ацентричности точность оказалась недостаточной по сравнению с таковой из работы [12] ввиду того, что в качестве одного из эталонов был выбран углекислый газ.

Модель ЛК, являясь единым многоконстантным УС, описывает изменение плотности менее точно, чем эмпирическое локальное обобщенное термическое уравнение и фундаментальные обобщенные УС, но оно приемлемо для расчета легких фракций [13]. Для тех же классов углеводородов можно применять УС ЛЭЭ и РК, относительная погрешность которых ожидается в пределах 1...2 % [1].

В данной статье приведены зависимости плотности и теплоемкости от температуры и

давления для этилена, определенные с помощью УС РК, ЛЭЭ и ЛК. Полученные результаты сравнивались со стандартными справочными данными [14, 15].

**Математическая модель и УС.** Зависимости теплофизических свойств этилена от давления  $p$  и температуры  $T$  определяются с использованием следующих УС.

• Уравнение ЛК

$$\frac{p_r V_r^{(0)}}{T_r} = 1 + \frac{B}{V_r^{(0)}} + \frac{C}{(V_r^{(0)})^2} + \frac{D}{(V_r^{(0)})^5} + \frac{c_4}{T_r^3 (V_r^{(0)})^2} \left[ \beta + \frac{\gamma}{(V_r^{(0)})^2} \right] e^{-\gamma/(V_r^{(0)})^2}, \quad (1)$$

где  $p_r$ ,  $T_r$  и  $V_r^{(0)}$  — приведенные давление, температура и объем простого вещества соответственно;

$$B = b_1 - \frac{b_2}{T_r} - \frac{b_3}{T_r^2} - \frac{b_4}{T_r^3}$$

( $b_1, b_2, b_3, b_4$  — константы простого вещества);

$$C = c_1 - \frac{c_2}{T_r} + \frac{c_3}{T_r^3}$$

( $c_1, c_2, c_3$  — константы простого вещества);

$$D = d_1 + \frac{d_2}{T_r}$$

( $d_1, d_2$  — константы простого вещества);  $c_4, \beta, \gamma$  — константы простого вещества.

Разность энтальпий, используемая при нахождении зависимости теплоемкости от температуры и давления, вычисляется по формуле:

$$\left( \frac{H^0 - H}{RT_c} \right)^{(0)} = -T_r \left[ Z^{(0)} - 1 - \frac{b_2 + \frac{2b_3}{T_r} + \frac{3b_4}{T_r^2}}{T_r (V_r^{(0)})} - \frac{c_2 - \frac{3c_3}{T_r^2}}{2T_r (V_r^{(0)})^2} + \frac{d_2}{5T_r (V_r^{(0)})^5} + 3E \right], \quad (2)$$

где  $H^0$  и  $H$  — опорное значение энтальпии и энтальпия при заданных условиях;  $R$  — универсальная газовая постоянная;  $T_c$  — критическая температура;  $Z^{(0)}$  — коэффициент сжимаемости простого вещества;

$$E = \frac{c_4}{2T_r^3 \gamma} \left\{ \beta + 1 - \left[ \beta + 1 + \frac{\gamma}{(V_r^{(0)})^2} \right] e^{-\gamma/(V_r^{(0)})^2} \right\}.$$

• Уравнение ЛЭЭ

$$p = \frac{RT}{V-b} - \frac{a}{V(V-b)} + \frac{bc}{V(V-b)(V+b)},$$

где коэффициенты  $V$  — объем при заданных условиях;  $a$ ,  $b$ ,  $c$  — коэффициенты, определяемые по [1].

В этом случае разница энтальпий имеет вид

$$\begin{aligned} H - H^0 &= (A - A^0) + T(S - S^0) + RT(Z - 1) = \\ &= \frac{a - bRT}{b} \ln\left(\frac{V-b}{V}\right) - \frac{c}{2b} \ln\left(\frac{V^2 - b^2}{V^2}\right) + \\ &+ \frac{(bR - a')T}{b} \ln\left(\frac{V-b}{V}\right) + \frac{Tc'}{2b} \ln\left(\frac{V^2 - b^2}{V^2}\right) + \\ &+ \frac{RTb - a}{V-b} + \frac{bc}{(V-b)(V+b)}, \end{aligned} \quad (4)$$

где  $A$ ,  $A^0$  и  $S$ ,  $S^0$  — энергия Гельмгольца и энтропия при заданных условиях и опорных параметрах соответственно;  $Z$  — коэффициент сжимаемости данного вещества;  $a'$  и  $c'$  — производные от коэффициентов  $a$  и  $c$  по температуре.

• Обобщенное уравнение РК

$$\frac{pV}{RT} = \frac{V}{V-b} - \frac{\Omega_a}{\Omega_b} \frac{b}{(V+b)} F, \quad (5)$$

где  $\Omega_a$ ,  $\Omega_b$  — постоянные числа;  $F = T_r^{-1.5}$  — соответствует оригиналу уравнения РК.

$$\begin{aligned} H - H^0 &= (A - A^0) + T(S - S^0) + RT(Z - 1) = \\ &= \left[ -\frac{3}{2} \frac{a}{T^{0.5}b} \ln\left(\frac{V+b}{V}\right) \right] + \frac{RTb}{V-b} - \frac{a}{T^{0.5}(V+b)} \end{aligned} \quad (6)$$

Определение зависимостей теплоемкости от температуры и давления по уравнениям (1)–(6) выполняется с помощью прямого дифференцирования. Результаты расчетов сравнивают со стандартными справочными данными [14].

Для решения указанных уравнений необходимо знать такие характеристики рабочего тела, как фактор ацентричности [16], критические температуру и давление [14], значения которых приняты соответственно равными 0,087; 282,35 К и 5,042 МПа.

**Результаты исследования.** По описанной методике построены функциональные зависимости плотности и теплоемкости этилена от температуры  $T$  при сверхкритическом давлении  $p = 15$  МПа (рис. 1). Интервал изменения  $T$  составлял 130...450 К вследствие отсутствия

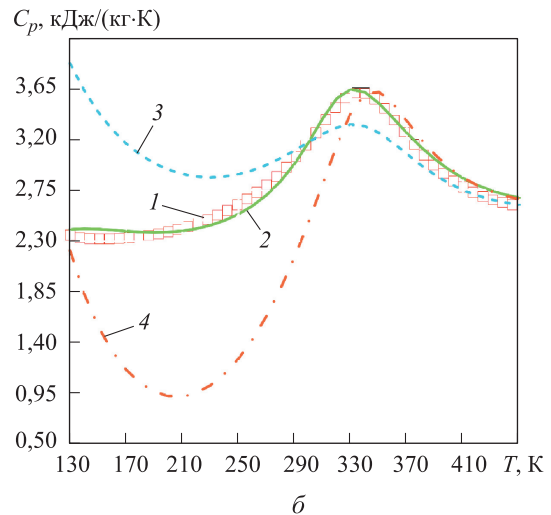
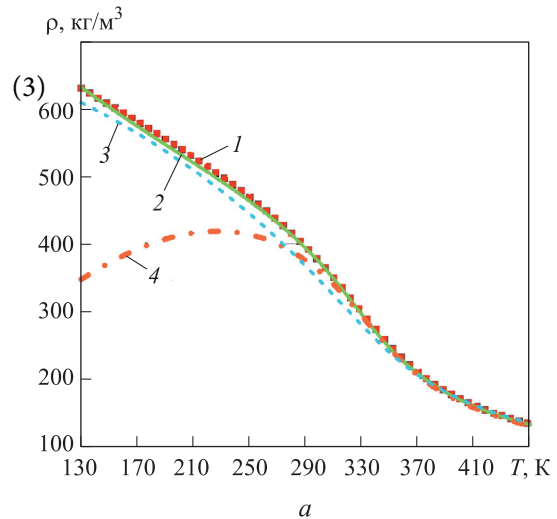


Рис. 1. Зависимости плотности  $\rho$  (а) и теплоемкости  $C_p$  (б) этилена от температуры  $T$  при давлении  $p = 15$  МПа, построенные по [14] (1) и уравнениям ЛК (2), РК (3) и ЛЭЭ (4)

надежных экспериментальных данных при высоких температурах и большого разброса значений при низких температурах [11]. Из рис. 1 следует, что наименьшие отклонения расчетных данных от экспериментальных [14] демонстрирует уравнение ЛК. Также хорошо описывает свойства этилена в жидкой и газовой фазах уравнение РК. Использование уравнения ЛЭЭ приводит к существенным отклонениям в интервале температур 130...290 К.

Оценка погрешности для уравнений ЛК и РК проведена по формуле

$$\delta = \frac{\sum_j^K \left| \frac{\rho_{p,r} - \rho_{ГСССД}}{\rho_{ГСССД}} \right|}{K} 100\%,$$

где  $\rho_{p,r}$  — плотность реального газа;  $\rho_{ГСССД}$  — плотность по стандартным справочным дан-

ным [14];  $K$  — число значений температуры (шаг  $\Delta T = 1$  К).

Для ЛК  $\delta = 1,024$  %, для РК  $\delta = 3,778$  %. Таким образом, показано, что из трех выбранных УС наименьшее отклонение от стандартных справочных данных [14] имеют результаты, полученные по уравнению ЛК.

Анализ зависимостей теплоемкости этилена от температуры показал их схожесть с зависимостями  $\rho = f(T)$ . Также подтверждена непригодность уравнения ЛЭЭ для описания волюметрических свойств веществ вследствие первоначального составления УС для определения энтальпий и констант фазовых равновесий.

Для уравнения ЛК дополнительно определены зависимости плотности и теплоемкости от температуры для различных значений давления (рис. 2).

Из рис. 2, а следует, что при фазовом переходе наблюдается скачкообразное изменение плотности для  $p = 0,1$  МПа. При повышении давления графики, отражающие зависимость плотности от температуры, становятся более пологими. В рассматриваемых диапазонах давлений и температур значения плотности по уравнению ЛК близки к результатам расчета по вириальному УС [14].

Зависимости теплоемкости этилена (рис. 2, б) имеют максимум в сверхкритической области, который уменьшается и смещается вправо при увеличении давления. По представленным графикам видно хорошее совпадение результатов расчета по УС ЛК и вириальному УС.

Для рассматриваемых диапазонов давлений и температур рассчитана погрешность определения плотности по уравнению ЛК относительно вириального УС с шагом 10 К по температуре и 5 МПа по давлению:

$$\delta = \frac{\sum_{i=1}^N \left( \sum_j^K \left| \frac{\rho_{\text{ЛК}} - \rho_{\text{ГСССД}}}{\rho_{\text{ГСССД}}} \right| \right)}{NK} \cdot 100 \% = 0,852 \%$$

где  $N$  — число значений давлений;  $\rho_{\text{ЛК}}$  — плотность этилена, вычисленная по уравнению ЛК.

Расчет погрешности для теплоемкости для тех же диапазонов температур и давлений выполнен по формуле

$$\delta_{C_p} = \frac{\sum_{i=1}^N \left( \sum_j^K \left| \frac{C_{p\text{ЛК}} - C_{p\text{ГСССД}}}{C_{p\text{ГСССД}}} \right| \right)}{NK} \cdot 100 \% = 2,285 \%$$

Таким образом, погрешность определения плотности по УС ЛК в рассматриваемых диапазонах температур и давлений не превышает 1 %, а погрешность определения теплоемкости — 2,5 %. Это позволяет говорить о возможности использования полученных зависимостей для расчета течения этилена в проточных трактах.

### Выводы

1. По трем известным УС реального газа (ЛК, ЛЭЭ и РК) и по вириальному УС [14] определены зависимости плотности и теплоем-

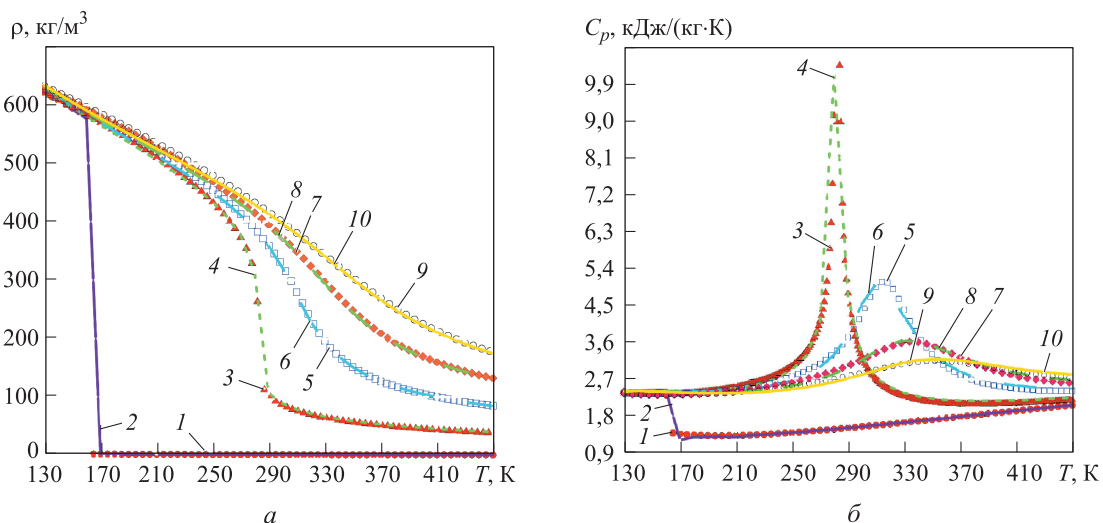


Рис. 2. Зависимости плотности  $\rho$  (а) и теплоемкости  $C_p$  (б) этилена от температуры  $T$ , построенные по вириальному УС [14] (1, 3, 5, 7, 9) и уравнению ЛК (2, 4, 6, 8, 10) при различных значениях давления: 1, 2 —  $p = 0,1$  МПа; 3, 4 —  $p = 5$  МПа; 5, 6 —  $p = 10$  МПа; 7, 8 —  $p = 15$  МПа; 9, 10 —  $p = 20$  МПа

кости от температуры и давления в широких диапазонах.

2. При давлении  $p = 15$  МПа в доверительном интервале температур  $T = 130 \dots 450$  К наименьшее отклонение от стандартных справочных данных [14] получено по уравнению ЛК ( $\delta = 1,024$  %). В том же интервале температур в диапазоне давлений  $p = 0,1 \dots 20$  МПа отклоне-

ние плотностей, рассчитанных по уравнению ЛК, от стандартных справочных данных [14] составило  $\delta = 0,852$  %, а отклонение теплоемкостей  $\delta_{C_p} = 2,285$  %.

3. Уравнение ЛК можно использовать при расчетах течения этилена в различных проточных трактах.

## Литература

- [1] Рид Р., Праусниц Дж., Шервуд Т. *Свойства газов и жидкостей*. Ленинград, Химия, 1982. 592 с.
- [2] Cocks P.A.T., Dawes W.N., Cant R.S. Simulations of the SCHOLAR Scramjet Experiments. *50<sup>th</sup> AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition*, Nashville, 9–12 January 2012, TN, United States, 2012, 0944. 21 p.
- [3] Суржиков С.Т. Моделирование радиационно-конвективного нагрева модельных камер ПВРД на водородном и углеводородном топливе. *Физико-химическая кинетика в газовой динамике*, 2014, т. 15, вып. 3. URL: <http://chemphys.edu.ru/issues/2014-15-3/articles/230/> (дата обращения 15 ноября 2017).
- [4] Huber M.L. *NIST standard reference database 4-NIST thermophysical properties of hydrocarbon mixtures. Version 3.1*. National Institute of Standards, Gaithersburg, MD, 2003.
- [5] Брусиловский А.И. *Фазовые превращения при разработке месторождений нефти и газа*. Москва, Грааль, 2002. 575 с.
- [6] Григорьев Б.А., Богатов Г.Ф., Герасимов А.А. *Теплофизические свойства нефти, нефтепродуктов, газовых конденсатов и их фракций*. Москва, Изд-во МЭИ, 1999. 372 с.
- [7] Уэйлес С. *Фазовые равновесия в химической технологии*. Ч. 1. Москва, Мир, 1989. 304 с.
- [8] Уэйлес С. *Фазовые равновесия в химической технологии*. Ч. 2. Москва, Мир, 1989. 360 с.
- [9] Герасимов А.А., Александров И.С., Григорьев Б.А., Люгай Д.В. Анализ точности расчета термодинамических свойств природных углеводородов и сопутствующих газов по обобщенным кубическим уравнениям состояния. *Вести газовой науки*, 2015, № 4(24), с. 5–13.
- [10] Abolpour B. Investigating effects of molecular structure on the behavior of saturated liquid hydrocarbons using a novel semi-empirical equation of state. *Fluid phase equilibria*, 2018, vol. 456, pp. 184–192.
- [11] Estela-Urbe J.F. A three-parameter corresponding states model for non-polar fluids based on multiparameter reference equations of state. *Fluid phase equilibria*, 2011, vol. 304(1–2), pp. 86–104.
- [12] Sun L., Ely J.F. A Corresponding states model for generalized engineering equations of state. *International Journal of Thermophysics*, 2005, vol. 26(3), pp. 705–727.
- [13] Григорьев Б.А., Герасимов А.А., Александров И.С. Анализ и разработка методов расчета плотности нефти, газовых конденсатов и их фракций на основе многоконстантных обобщенных фундаментальных уравнений состояния. *Вести газовой науки*, 2013, № 1(12), с. 4–12.
- [14] ГСССД 47–83. *Этилен жидкий и газообразный. Плотность, энтальпия, энтропия и изобарная теплоемкость при температурах 130–450 К и давлениях 0,1–100 МПа*. Москва, Госстандарт СССР, Изд-во Стандартов, 1983. 15 с.
- [15] Сычев В.В., Вассерман А.А., Головский Е.А., Козлов А.Д., Спиридонов Г.А., Цымарный В.А. *Термодинамические свойства этилена*. Москва, Изд-во Стандартов, 1981. 280 с.
- [16] Poling B.E., Prausnitz J.M., O'Connell J.P. *The properties of gases and liquids*. New York, McGraw-Hill, 2001. 768 p.

## References

- [1] Rid R., Prausnitz Dzh., Shervud T. *Svoistva gazov i zhidkosti* [The properties of gases and liquids]. Leningrad, Khimiia publ., 1982. 592 p.
- [2] Cocks P.A.T., Dawes W.N., Cant R.S. Simulations of the SCHOLAR Scramjet Experiments. *50<sup>th</sup> AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition*, Nashville, 9–12 January 2012, TN, United States, 2012, 0944. 21 p.
- [3] Surzhikov S.T. Modelirovanie radiatsionno-konvektivnogo nagreva model'nykh kamer PVRD na vodorodnom i uglevodorodnom toplive [Simulation of radiation-convective heating of model cameras of ramjets on hydrocarbon and hydrogen fuels]. *Fiziko-khimicheskaiia kinetika v gazovoi dinamike* [Physical-Chemical Kinetics in Gas Dynamics]. 2014, vol. 15, is. 3. Available at: <http://chemphys.edu.ru/issues/2014-15-3/articles/230/> (accessed 15 November 2017).
- [4] Huber M.L. *NIST standard reference database 4-NIST thermophysical properties of hydrocarbon mixtures. Version 3.1*. National Inst. of Standards, Gaithersburg, MD, 2003.
- [5] Brusilovskii A.I. *Fazovye prevrashcheniia pri razrabotke mestorozhdenii nefti i gaza* [Phase transformations in the development of oil and gas fields]. Moscow, Graal' publ., 2002. 575 p.
- [6] Grigor'ev B.A., Bogatov G.F., Gerasimov A.A. *Teplofizicheskie svoistva nefti, nefteproduktov, gazovykh kondensatov i ikh fraktsii* [Thermophysical properties of oil, oil products, gas condensates and their fractions]. Moscow, MEI publ., 1999. 372 p.
- [7] Ueiles S. *Fazovye ravnesiia v khimicheskoi tekhnologii. Chast' 1* [Phase equilibrium in chemical engineering. Part 1]. Moscow, Mir publ., 1989. 304 p.
- [8] Ueiles S. *Fazovye ravnesiia v khimicheskoi tekhnologii. Chast' 2* [Phase equilibrium in chemical engineering. Part 2]. Moscow, Mir publ., 1989. 360 p.
- [9] Gerasimov A.A., Aleksandrov I.S., Grigor'ev B.A., Liugai D.V. Analiz tochnosti rascheta termodinamicheskikh svoistv prirodnikh uglevodorodov i soputstvuiushchikh gazov po obobshchennym kubicheskim uravneniiam sostoianiia [The analysis of accuracy of calculations related to thermodynamic properties of natural hydrocarbons and accompanying gases using the generalized cubic equations of state]. *Vesti gazovoi nauki* [Lead gas science]. 2015, no. 4(24), pp. 5–13.
- [10] Abolpour B. Investigating effects of molecular structure on the behavior of saturated liquid hydrocarbons using a novel semi-empirical equation of state. *Fluid phase equilibria*, 2018, vol. 456, pp. 184–192.
- [11] Estela-Urbe J.F. A three-parameter corresponding states model for non-polar fluids based on multiparameter reference equations of state. *Fluid phase equilibria*, 2011, vol. 304(1–2), pp. 86–104.
- [12] Sun L., Ely J.F. A Corresponding states model for generalized engineering equations of state. *International Journal of Thermophysics*, 2005, vol. 26(3), pp. 705–727.
- [13] Grigor'ev B.A., Gerasimov A.A., Aleksandrov I.S. Analiz i razrabotka metodov rascheta plotnosti nefti, gazovykh kondensatov i ikh fraktsii na osnove mnogokonstantnykh obobshchennykh fundamental'nykh uravnenii sostoianiia [Analysis and development of methods to calculate the density of oil, gas condensates and their fractions based on the multiparameter generalized fundamental equations of state]. *Vesti gazovoi nauki* [Lead gas science]. 2013, no. 1(12), pp. 4–12.
- [14] GSSSD 47–83. *Etilen zhidkii i gazoobraznyi. Plotnost', ental'piia, entropiia i izobarnaia teploemkost' pri temperaturakh 130–450 K i davleniia 0.1–100 MPa* [SSSRD 47–83. Ethylene liquid and gas. Density, enthalpy, entropy and heat capacity at constant pressure at temperatures of 130–450 K and pressure 0.1–100 MPa]. Moscow, Gosstandart SSSR, Standartinform publ., 1983. 15 p.
- [15] Sychev V.V., Vasserman A.A., Golovskii E.A., Kozlov A.D., Spiridonov G.A., Tsymarnyi V.A. *Termodinamicheskie svoistva etilena* [Thermodynamic properties of ethylene]. Moscow, Standartinform publ., 1981. 280 p.
- [16] Poling B.E., Prausnitz J.M., O'Connell J.P. *The properties of gases and liquids*. New York, McGraw-Hill, 2001. 768 p.

## Информация об авторах

**КУКШИНОВ Николай Владимирович** (Москва) — кандидат технических наук, научный сотрудник ФГУП «ЦИАМ им. П.И. Баранова», доцент кафедры «Теплофизика». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: kukshinov@ciam.ru).

**МАМЫШЕВ Дмитрий Леонидович** (Москва) — инженер. ФГУП «ЦИАМ им. П.И. Баранова» (111116, Москва, Российская Федерация, Авиамоторная ул., д. 2, e-mail: mr.dmitry.dq.1234@gmail.com).

## Information about the authors

**KUKSHINOV Nikolay Vladimirovich** (Moscow) — Candidate of Science (Eng.), Researcher, Federal State Unitary Enterprise Baranov Central Institute of Aviation Motors CIAM, Associate Professor, Department of Thermal Physics. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2<sup>nd</sup> Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: kukshinov@ciam.ru).

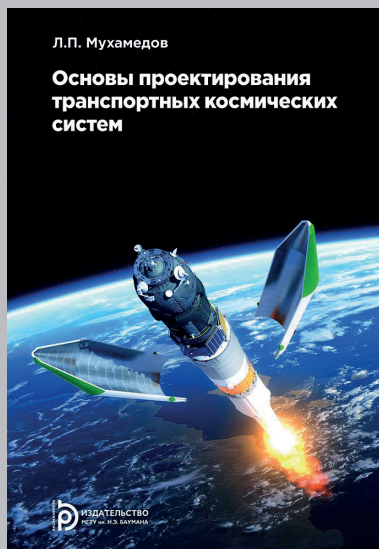
**MAMYSHEV Dmitriy Leonidovich** (Moscow) — Engineer. Federal State Unitary Enterprise Baranov Central Institute of Aviation Motors CIAM (111116, Moscow, Russian Federation, Aviamotornaya St., Bldg. 2, e-mail: mr.dmitry.dq.1234@gmail.com).

### Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Кукшинов Н.В., Мамышев Д.Л. Оценка применимости различных уравнений состояния реального газа для этилена. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2018, № 5, с. 60–66, doi: 10.18698/0536-1044-2018-5-60-66.

### Please cite this article in English as:

Kukshinov N.V., Mamyshev D.L. Evaluation of the Applicability of Different Equations of State of the Real Gas for Ethylene. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 2018, no. 5, pp. 60–66, doi: 10.18698/0536-1044-2018-5-60-66.



В Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана

вышло в свет учебное пособие

**Л.П. Мухамедова**

### «Основы проектирования транспортных космических систем»

Изложены основы проектирования транспортных космических систем с жидкостными ракетными двигателями, предназначенных для доставки полезных грузов на целевые орбиты и траектории назначения, и их составляющих: ракет-носителей и разгонных блоков.

Рассмотрено формирование граничных условий решения задач баллистического проектирования. Предложены инженерные методики выбора основных проектных параметров и определения энергомассовых и геометрических характеристик проектируемого изделия в составе ракетного комплекса. Приведены численные примеры решения задач баллистического проектирования транспортных космических систем.

Для студентов старших курсов машиностроительных вузов, а также для специалистов, занимающихся разработкой ракетно-космических систем.

**По вопросам приобретения обращайтесь:**

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.  
Тел.: +7 499 263-60-45, факс: +7 499 261-45-97;  
press@bmstu.ru; www.baumanpress.ru