

УДК 621.436

doi: 10.18698/0536-1044-2022-7-49-67

# Расчет и корректировка упругих свойств моторных топлив и других жидкостей\*

Л.В. Грехов<sup>1</sup>, В.А. Марков<sup>1</sup>, Н.А. Арсенов<sup>1</sup>, Ц. Чжао<sup>2</sup><sup>1</sup> МГТУ им. Н.Э. Баумана<sup>2</sup> Харбинский инженерный университет

## Analysis and Correction of Individual Property Values of Motor Fuels and Other Liquids

L.V. Grekhov<sup>1</sup>, V.A. Markov<sup>1</sup>, N.A. Arsenov<sup>1</sup>, J. Zhao<sup>2</sup><sup>1</sup> Bauman Moscow State Technical University<sup>2</sup> Harbin University of Engineering

Обоснована необходимость конкретной формы уравнения состояния, отличающейся простыми и удобными для использования выражениями, которые позволяют быстро и с достаточной точностью определять упругие свойства моторных топлив. Предложен удобный метод расчета констант для выбранной формы уравнения состояния и представления их в виде выражений, отражающих зависимость констант от температуры топлива. На основании экспериментальных данных по выбранному параметру — скорости звука, приведенных в литературных источниках, предложен метод увеличения точности расчета путем введения в расчетные выражения универсальных коэффициентов, отражающих нелинейное влияние температуры и давления для каждой рассмотренной жидкости. Продемонстрирована возможность применения разработанных методов поиска констант уравнения состояния и увеличения точности расчетных данных для топлив, калибровочных и других технических жидкостей.

**Ключевые слова:** топливная система, уравнение состояния, альтернативные топлива, высокие и ультравысокие давления, константы уравнения состояния, упругие свойства топлив

The article substantiates the necessity of a specific form of the equation of state having simple and easy-to-use expressions that allow calculating the elastic properties of motor fuels quickly and with sufficient accuracy. An easy-to-use method is proposed for calculating the constants for the chosen form of the equation of state and presenting them in the form of expressions reflecting the temperature dependence of the constants. Based on the literature sources containing experimental data on the selected parameter — the speed of sound, a method is proposed for increasing the accuracy of the calculation by introducing universal coefficients reflecting the nonlinear effects of temperature and pressure for each considered liquid. The possibility of applying the developed methods of searching for constants of the equation of state, as well as increasing the accuracy of calculated data for a number of fuels, calibration and other technical liquids is demonstrated.

**Keywords:** fuel system, equation of state, alternative fuels, high and ultrahigh pressures, equation of state constants, elastic properties of fuels

\* Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (грант № 075-15-2021-1028).

**Обоснование вида уравнения состояния (УС) для высоконапорного впрыска топлива.** На сегодняшний день в двигателестроении наблюдается тенденция разработки дизельных двигателей (далее дизели) с высокими энергетическими и экологичными (соответствующими жестким требованиям по эмиссии вредных веществ) показателями.

Одним из самых популярных методов достижения требуемых показателей считается интенсификация процесса топливоподачи [1]. Эффективность повышения давления впрыска доказана многими исследованиями. Так, в работах [2, 3] показана возможность улучшения экологических показателей дизеля повышением давления впрыска до 300...320 МПа, а в трудах [4, 5] — до 350...400 МПа.

Другим методом улучшения экологических показателей дизелей является использование альтернативных топлив [6, 7], в качестве которых обычно выступают биотоплива (БТ) на основе растительных масел, эфиров и спиртов, а также их смеси с дизельным топливом (ДТ).

Использование альтернативных топлив, как правило, сопровождается некоторыми негативными явлениями. Например, применение растительных масел в качестве топлива дизелей приводит к повышению его расхода и нагарообразованию [8, 9].

При расчете работы топливной системы с альтернативным топливом нельзя использовать обычные эмпирические выражения для модуля упругости, скорости звука или плотности технической жидкости (далее жидкость). С учетом необходимости повышения давления впрыска старые эмпирические зависимости становятся неадекватными при 80...100 МПа и характеризуются значительной дисперсией [10].

В связи с этим осуществляется поиск способов описания актуальных физических свойств традиционных и альтернативных топлив для расчета процессов, происходящих в современных топливных системах дизелей.

Предпринято много попыток описания свойств различных жидкостей в зависимости от параметров состояния. Относительно традиционных ДТ возникают дополнительные сложности из-за различий сырья, мест его добычи, технологий обработки и т. д.

Известны работы по описанию свойств топлив в зависимости от их фракционного состава [11, 12]. При наличии различных данных по

одному и тому же топливу возникает необходимость создания сложных и объемных баз данных и рекомендаций по прогнозированию свойств топлив в зависимости от содержания различных фракций и компонентов.

Выбор методов обработки экспериментальных данных и способа расчета свойств топлив влияет на скорость создания информационной базы расчетов. Успешность реализации этого зависит от выбора простых и удобных для прямых и обратных пересчетов математических зависимостей важнейших физических свойств жидкости от параметров состояния.

Наличие таких зависимостей, отвечающих условиям маршевого счета, обуславливает вид математических моделей нестационарного процесса топливоподачи.

Цель работы — получение пригодного для практических расчетов нестационарных процессов топливоподачи УС и входящих в него констант, применимых для различных топлив как однофазных жидкостей при ультравысоких давлениях и умеренных температурах.

Для нахождения указанных зависимостей можно использовать УС, которое в общем виде определяется как

$$\rho = f(p, T),$$

где  $\rho$  — плотность, давление и температура жидкости соответственно.

Необходимость введения формы УС, отвечающей перечисленным требованиям, подтверждается использованием современных математических моделей. Они отличаются от традиционных моделей более точным описанием топливоподачи для традиционных и альтернативных топлив, учетом непостоянства упругих свойств в процессе впрыска топлива, применением уравнений массового баланса вместо уравнений объемного баланса и т. д.

Основная задача введения новой формы УС и выражений на его основе заключается в замене менее универсальных традиционных эмпирических соотношений более совершенными. Попытки такой замены в форме УС предпринимались ранее, но многие из предложенных уравнений по-прежнему применимы только к невысоким давлениям впрыска [13].

Известным подходом к описанию УС является установление формальных связей между основными параметрами состояния. Связи можно представить в виде полиномов или других функций [14, 15]. Для упругих свойств

топлив подобные соотношения можно записать как

$$\rho = \sum_{i=1}^3 \left( \sum_{j=1}^3 a_{ij} T^{j-1} \right) p^{i-1}, \quad (1)$$

где  $a_{ij}$  — коэффициенты.

УС в форме (1) популярны при расчете процесса топливоподачи с использованием альтернативных топлив [16, 17], но в условиях маршевого счета они неудобны для обратных расчетов.

Также распространенным подходом является применение УС, базирующихся на статистической теории ассоциативной жидкости как возмущенных цепей (PC-SAFT). Эти УС основаны на статистических методах.

Для прогнозирования упругих свойств с помощью подобных соотношений в качестве эталонной жидкости приняты сферические частицы, поверхности которых связаны друг с другом и взаимодействуют через межмолекулярный потенциал. Применение УС в форме PC-SAFT оправдано точностью описания условий равновесия на границах рассматриваемой жидкости.

Уравнения PC-SAFT получили дальнейшее развитие во многих исследовательских работах [11]. Так, в статье [18] рассмотрено применение искусственных нейронных сетей в совокупности с модификациями УС PC-SAFT.

Среди различных УС наиболее известным является уравнение для реального газа Ван-Дер-Ваальса [19], которое в общем виде можно представить как

$$p = \frac{RT}{V-b} - \frac{a(T)}{(V+k_1b)(V+k_2b)}, \quad (2)$$

где  $R$  — универсальная газовая постоянная;  $V$  — объем жидкости;  $a$  — коэффициент, описывающий силы взаимодействия между молекулами;  $b$  — коэффициент, учитывающий объем молекул и пространство между ними;  $k_1, k_2$  — константы УС.

Исходное УС Ван-Дер-Ваальса справедливо в форме (2) при  $k_1 = k_2 = 0$ ,  $a(T) = p_c V_c^2$  и  $b = V_c/3$ , где  $p_c$  и  $V_c$  — критические давление и объем жидкости.

УС Редлиха — Квонга [20], являющееся развитием УС (2), учитывает парные взаимодействия компонентов смесей различных жидкостей. УС Редлиха — Квонга можно записать в форме (2) при  $k_1 = k_2 = 1$ ,  $a(T) = 0,4275RT_c^2/p_c$  и  $b = 0,00866RT_c/p_c$ , где  $T_c$  — критическая температура жидкости.

УС Пенга — Робинсона [21, 22], изначально разработанное для расчета парожидкостного равновесия в нефти, применялось и в других случаях (в частности, для моделирования низкотемпературных свойств ДТ). УС Пенга — Робинсона справедливо в форме (2) при  $k_1 = k_2 = 1$ ,  $a(T) = 0,4275RT_c^2/p_c$  и  $b = 0,0778RT_c/p_c$ .

В практических расчетах УС Пенга — Робинсона дает значительные погрешности, поэтому А.И. Брусиловский предложил модернизированное УС [23]

$$p = \frac{RT}{v-b} - \frac{a}{v(v+c)(v+d)}, \quad (3)$$

где  $v$  — удельный объем жидкости;  $a, b, c, d$  — коэффициенты уравнения для рассматриваемой жидкости.

Выражение (3) предусматривает зависимость коэффициентов парного взаимодействия от температуры.

Уравнения на базе УС (2) и (3) хорошо описывают поведение жидкостей с наличием большой доли газовой фазы и возможностью фазовых переходов. Однако при подаче топлива под высоким давлением оно обосновано считается однофазной капельной жидкостью. Поэтому применительно к описанию процесса топливоподачи при работе с высокими и ультравысокими давлениями впрыска уравнения (2) и (3) отражают упругие свойства жидкости со значительной погрешностью.

Коэффициенты указанных уравнений определяют экспериментально, их количество велико, особенно в выражении (3), а определение трудоемко в условиях маршевого счета.

Среди УС, описывающих свойства капельной жидкости, наиболее простым и физически обоснованным является УС Тэйта. Это уравнение разработано для определения осредненного коэффициента сжимаемости воды, стекла и ртути, а также температуры на морских глубинах.

В работе [24] описано состояние сжатого азота и аммиака с помощью указанного УС. Удачная форма уравнения Тэйта получила развитие и в настоящее время его обычно представляют в виде [24]

$$\frac{\rho - \rho_0}{\rho_0} = C \ln \left( \frac{B+p}{B+p_0} \right), \quad (4)$$

где  $\rho_0$  и  $p_0$  — параметры состояния при нормальном давлении жидкости;  $C$  и  $B$  — константы, зависящие от температуры.

В работе [25] предложено еще одно УС в форме Тэйта для определения коэффициента сжимаемости пяти нефтяных ДТ

$$\beta = \frac{pv_0}{RT} \left[ 1 - C \log_{10} \left( \frac{B+p}{B+0,1} \right) \right],$$

где  $v_0$ ,  $B$  — квадратичные функции с эмпирическими коэффициентами, зависящие от температуры;  $C$  — константа для конкретной жидкости;  $B$  и  $C$  являются константами УС Тэйта в форме (4).

В работе [12] предложена форма УС, схожая с УС Тэйта. Она использована для расчета плотности ДТ, причем данные по ней смоделированы с помощью УС PC-SAFT. Итоговое УС обобщено в форме Тэйта

$$\frac{\rho - \rho_0(T)}{\rho} = C \log_{10} \left[ \frac{p+B(T)}{p_0+B(T)} \right].$$

Приведенные УС в форме Тэйта можно применять для описания упругих свойств жидких топлив при высоких давлениях. Однако константы и вид этих уравнений не являются универсальными, что создает проблемы при реализации маршевого счета.

Таким образом, рассмотренные УС, описывающие связь между упругими свойствами и параметрами состояния жидких топлив, не полностью удовлетворяют требованиям, предъявляемым к ним при расчете нестационарного процесса топливоподачи (достаточная точность и адекватность результатов, наличие простой аналитической связи, учет переменных упругих свойств, удобная форма для прямых и обратных пересчетов).

Более простым и соответствующим требованиям, предъявляемым к форме уравнения, является УС Коула для воды [26]

$$\frac{B+p}{\rho^{\aleph}} = \frac{B}{\rho_0^{\aleph}} = \text{const}, \quad (5)$$

где  $B$ ,  $\aleph$  — константы, определяемые по экспериментальным данным, для морской воды  $B = 298,7$  МПа,  $\aleph = 7,15$ .

Более удобная и общая форма УС (5) предложена в работах [27–29]:

$$\left( \frac{\rho}{\rho_{0t}} \right)^{\aleph} = \frac{B+p}{B+p_0}, \quad (6)$$

где  $\rho_{0t}$  — плотность жидкости при актуальных значениях температуры и атмосферного давления.

Среди рассмотренных УС форма выражения (6) является наиболее подходящей для описания и прогнозирования упругих свойств жидких топлив при расчете топливоподачи в поршневых двигателях.

С помощью уравнения (6) и соотношений на его базе проведем обработку имеющихся экспериментальных данных по упругим свойствам традиционных, альтернативных топлив и других жидкостей. На основании результатов обработки создадим рекомендации по константам УС для чистых топлив и других жидкостей, а также по корректировке расчетных значений упругих свойств.

**Метод поиска констант УС.** Выражение (6) признано удачной формой УС для описания нестационарного процесса высоконапорной подачи топлива, хотя носит эвристический характер и не является следствием аналитического вывода.

При преобразовании выбранной формы УС можно получить выражения для описания упругих свойств топлив в зависимости от параметров состояния. Плотность топлива

$$\rho = \rho_{0t} \left( \frac{B+p}{B+p_0} \right)^{\frac{1}{\aleph}}. \quad (7)$$

С учетом выражения (7) скорость звука  $\alpha$  и коэффициент сжимаемости определяются как

$$\alpha = \sqrt{\left( \frac{dp}{d\rho} \right)} = \sqrt{\frac{\aleph}{\rho_0} B^{\frac{1}{\aleph}} (p+B)^{\frac{\aleph-1}{\aleph}}}; \quad (8)$$

$$\beta = \frac{1}{Ev} = \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dp} = \frac{1}{\aleph(p+B)}, \quad (9)$$

где  $E$  — модуль упругости.

В УС (6) и выражениях (7)–(9) имеются константы  $\aleph$  и  $B$ , определение которых для некоторых моторных топлив является важной задачей. От способа поиска констант для каждой конкретной жидкости и вида аппроксимирующих выражений зависит точность расчета упругих свойств, простота реализации при маршевом счете и удобство работы с будущей топливной базой.

Соотношения (7)–(9) использованы для расчета констант УС (6) различных жидких моторных топлив и других жидкостей.

Поиск констант УС основан на обработке имеющихся экспериментальных данных и последующем представлении расчетных значений

констант в виде функций температуры:  $B = f(T)$ ,  $\aleph = f(T)$ . Наличие зависимости констант уравнения (6) от температуры позволяет его называть УС.

Зависимости констант УС (6) от температуры представим в виде

$$B = B_0 + B_1T + B_2T^2 + \dots + B_nT^n; \quad (10)$$

$$\aleph = \aleph_0 + \aleph_1T + \aleph_2T^2 + \dots + \aleph_nT^n, \quad (11)$$

где  $B_0, B_1, B_2, \dots, B_n, \aleph_0, \aleph_1, \aleph_2, \dots, \aleph_n$  — полиномиальные коэффициенты.

Для обеспечения большей универсальности выражений и простоты реализации предлагаемого метода поиска констант полиномы (10), (11) ограничены третьей степенью. Метод поиска расчетных значений констант уравнения состояния (6) основан на сравнении расчетных и экспериментальных значений упругих свойств.

Экспериментальные данные для обработки получены на безмоторных топливных стендах [10], [27–29] и заимствованы из литературных источников [30–48]. Сходимость расчетных и экспериментальных данных обеспечена выбором значений набора констант в выражениях (7)–(9).

Подбор констант УС (6) проведен при фиксированных температурах в заданном диапазоне давления жидкости. Поиск совокупности констант для каждой температуры жидкости выполнен с помощью программы, отвечающей перечисленным условиям.

Работа программы реализована по следующему алгоритму:

- создание и ввод в программу файла с экспериментальными данными об упругих свой-

ствах жидкости для заданного диапазона давления при постоянной температуре;

- внешний цикл программы по сканированию значений констант  $B$  в диапазоне давления жидкости;

- внутренний цикл программы по сканированию значений констант  $\aleph$  в диапазоне давления жидкости;

- расчет упругих свойств жидкости при текущем давлении с каждым из полученных сочетаний констант  $B$  и  $\aleph$ ; определение ошибки несовпадения с экспериментальными значениями;

- суммирование ошибки по всему диапазону давления жидкости для каждого сочетания констант; выбор оптимальной совокупности констант по критерию минимальной суммы ошибок.

Программа позволяет получать оптимальные значения констант УС (6) для каждой конкретной температуры. Далее для констант выполняется аппроксимация по температуре в виде полиномов (10), (11). Количество расчетных процедур программы и обрабатываемых файлов обуславливает диапазон температур, при которых построенную аппроксимацию типа (10), (11) можно применить.

На рис. 1 продемонстрирована аппроксимация констант  $B$  и  $\aleph$  уравнения состояния (6) в диапазоне температур, обусловленном экспериментальными данными для этанола [36] в среде Excel.

С помощью предложенного метода поиска констант обработаны экспериментальные данные по 50 моторным топливам и другим жидкостям. Результаты обработки — значения полиномиальных коэффициентов констант  $B$

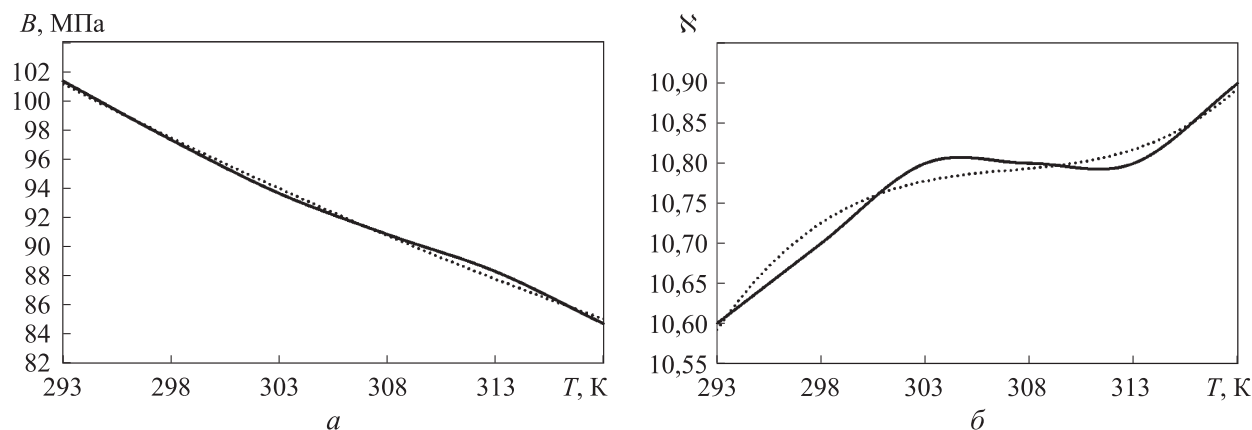


Рис. 1. Расчетные (—) и аппроксимирующие (.....) зависимости констант  $B$  (а) и  $\aleph$  (б) от температуры этанола  $T$

и  $\kappa$ , рекомендуемые для УС (10), (11) при различных значениях температуры, — приведены в табл. 1. Здесь введены следующие обозначения: SV — скорость звука в жидкости; CF — коэффициент сжимаемости жидкости; D — плотность жидкости; КЖ — калибровочная жидкость.

Наборы полиномиальных коэффициентов позволяют получать расчетные значения констант УС (6) в зависимости от температуры жидкости, диапазон которой определен ис-

пользуемыми экспериментальными данными.

Полученные с помощью предложенного метода аппроксимации константы УС можно использовать в математических моделях, описывающих нестационарный неизотермический процесс топливоподачи при высоких и ультравысоких давлениях жидкости, а также в иных случаях, требующих описания движения жидкости при непостоянстве параметров состояния и высоком уровне давления.

Таблица 1

**Значения полиномиальных коэффициентов констант  $B$  и  $\kappa$ , рекомендуемые для УС (10), (11) при различных значениях температуры**

Свойство	Тип жидкости (стандарт)	T, К	$B_0$	$B_1 \cdot 10^2$	$B_2 \cdot 10^3$	$B_3 \cdot 10^6$	$\kappa_0$	$\kappa_1 \cdot 10^3$	$\kappa_2 \cdot 10^5$	$\kappa_3 \cdot 10^7$
			МПа							
SV	ДТ S250 [30]	293...373	271,41	-47,35	0	0	14,90	0	0	0
	ДТ S300 [30]	293...373	251,02	-42,11	0	0	14,90	0	0	0
	ДТ Ultra [31]	293...318	370,74	-79,31	0	0	1280,00	-12433,30	4073,30	-444,44
	ДТ Shell [32]	273...353	212,37	16,64	-1,31	0	30,23	-120,60	18,70	0
	ДТ 2018 [33]	323	93,83	0	0	0	10,50	0	0	0
CF	ДТ 2018 [33]	323	88,81	0	0	0	11,20	0	0	0
SV	ДТ EN 590 [34]	293	152,50	0	0	0	9,90	0	0	0
D	ДТ 2008 [35]	288	152,50	0	0	0	9,90	0	0	0
	ДТ Shell Extra [35]	288	138,30	0	0	0	11,40	0	0	0
SV	БТ с добавкой RME [31]	293...318	416,94	-87,77	0	0	15,58	-36,21	7,1429	0
	Метил, эфир рапсового масла RME [32]	293...353	290,51	-9,412	-1,06	0	22,83	-78,75	12,50	0
	Метил, эфир соевого масла SME [32]	293...353	-178,69	269,26	-5,19	0	468,75	-4148,30	1248,80	-125
	Этанол РОСН фирмы Polish Chemicals [36]	293...318	737,35	-357,78	4,80	0	1706,36	16769,40	-5459,70	592,59
	н-Гептан марки Merck [36]	293...318	484,54	-200,25	2,19	0	-836,14	8303,10	-2715,60	296,30
	БТ (EN 14214) [34]	293	166,20	0	0	0	9,90	0	0	0
	Биоэтанол (ISO 9001) [34]	293	109,50	0	0	0	9,50	0	0	0
	Пальмовое масло [33]	323	182,90	0	0	0	8,40	0	0	0
CF	Пальмовое масло [33]	323	168,30	0	0	0	9,30	0	0	0

Продолжение табл. 1

Свойство	Тип жидкости (стандарт)	T, К	$B_0$	$B_1 \cdot 10^2$	$B_2 \cdot 10^3$	$B_3 \cdot 10^6$	$\kappa_0$	$\kappa_1 \cdot 10^3$	$\kappa_2 \cdot 10^5$	$\kappa_3 \cdot 10^7$
			МПа							
SV	Этанол [37]	253...353	269,72	-60,46	0	0	8,23	12	0	0
	Метанол [37]	253...353	274,36	-62,12	0	0	7,01	13,71	0	0
	Пропанол компании Sigma-Aldrich [37]	253...353	291,95	-64,63	0	0	9,28	13	0	0
	Бутанол компании Sigma-Aldrich [37]	253...353	301,38	-65,98	0	0	8,48	12,29	0	0
	n-Октан [38]	298...383	596,36	-261,32	3,07	0	-9,03	114,60	-16,00	0
	n-Гексадекан [38]	298...383	2064,66	-943,35	11,10	0	-11,78	59	0	0
	Метиллаурат [39]	293...353	318,13	-60,25	0	0	26,02	-86,75	12,50	0
	Этиллаурат [39]	293...353	316,61	-60,15	0	0	32,22	-126,60	18,7	0
	n- Нонан [40]	283...473	478,01	-164,75	1,46	0	7,70	5,90	0	0
Толуол [41]	283...473	652,11	-215,30	1,85	0	7,79	4,94	0	0	
SV	КЖ (ISO 4113) [42]	313...373	358,85	-73,05	0	0	-5,76	90,75	-12,50	0
D	КЖ (ISO 4113) [42]	313...373	-8,19·10 <sup>4</sup>	70251,00	-1992,20	1881,30	3450,00	-29853,70	8566,90	-812,50
SV	КЖ Normaf fluid [43]	283...423	239,83	60,727	-5,00	6,11	28,64	-159,40	46,80	-4,42
	КЖ Ravenol [44]	300...371	31,32	121,24	-2,87	0	42,43	-201,70	32,16	0
D	БТ из пальмового масла WPOB [35]	288	159,80	0	0	0	11,10	0	0	0
	БТ из подсолнечного масла SFOB [35]	288	171,90	0	0	0	10,50	0	0	0
	БТ из соевого масла SOB [35]	288	164,70	0	0	0	10,90	0	0	0
	БТ из кукурузного масла CPOB [35]	288	171,90	0	0	0	10,50	0	0	0
	БТ из рапсового масла SOB [35]	288	166,20	0	0	0	9,90	0	0	0
	БТ из хлопкового масла CSOB [35]	288	171,90	0	0	0	10,50	0	0	0
SV	БТ из соевого масла (EN 14214) [45]	293...343	416,94	-87,77	0	0	15,58	-36,21	7,14	0
	БТ из подсолнечного масла (EN 14214) [45]	293...343	416,94	-87,77	0	0	15,58	-36,21	7,14	0
	БТ из смеси соевого масла и говяжьего жира (EN 14214) [45]	293...343	416,94	-87,77	0	0	15,58	-36,21	7,14	0

Окончание табл. 1

Свойство	Тип жидкости (стандарт)	T, К	$B_0$	$B_1 \cdot 10^2$	$B_2 \cdot 10^3$	$B_3 \cdot 10^6$	$\kappa_0$	$\kappa_1 \cdot 10^3$	$\kappa_2 \cdot 10^5$	$\kappa_3 \cdot 10^7$
			МПа							
SV	БТ из пальмового масла (EN 14214) [45]	293...343	416,94	-87,77	0	0	15,58	-36,21	7,14	0
	Этилпальмитат [45]	293...343	416,94	-87,77	0	0	15,58	-36,21	7,14	0
	Этилстеарат [45]	293...343	416,94	-87,77	0	0	15,58	-36,21	7,14	0
	Этилолеат [45]	293...343	416,94	-87,77	0	0	15,58	-36,21	7,14	0
	Этиллинолеат [45]	293...343	416,94	-87,77	0	0	15,58	-36,21	7,14	0
	Чистая вода [46]	273...473	-4889,39	4017,38	-100,01	80,13	65,17	-463,30	119,24	-9,87
	Хлоргексан [47]	298...433	746,57	-323,47	3,76	0	174,26	-1445,60	422,25	-40,59
	Диизодоцилфталат [48]	298...413	353,97	-64,03	0	0	48,01	-310,50	87,50	-8,08

Представленный метод универсален и прост. Это позволяет значительно автоматизировать поиск новых соотношений при расчете констант УС (6) для актуальных моторных топлив и жидкостей. Пополнение базы данных с широкой номенклатурой жидких топлив позволит вести расчеты топливных систем с различными типами моторного топлива. В перспективе можно создать уточненные рекомендации по применению одного топлива (например, традиционного) с учетом происхождения базовой нефти, фракционного состава и особенностей производства.

**Расчет и корректировка расчетных значений упругих свойств.** Для расчета упругих свойств топлив использованы выражения (6)–(9). После реализации метода определения констант УС появляется возможность получения расчетных значений упругих свойств для конкретной жидкости в определенных экспериментом диапазонах давления и температуры топлива.

Расчетные зависимости скорости звука от давления и температуры ДТ и БТ на основе рапсового масла [31] приведены на рис. 2. Там же показаны результаты эксперимента.

Сравнение расчетных и экспериментальных данных выполнено для всех исследуемых жидкостей, но в силу большого объема материалов и аналогичности по характеру кривых, они не приведены.

Как видно из рис. 2, а и в, расчетные зависимости скорости звука в ДТ и БТ на основе рапсового масла от давления хорошо совпадают с

экспериментальными данными. В то же время для некоторых жидкостей наблюдается заметное несовпадение этих данных, особенно в зависимости от температуры (рис. 2, б, г). Для достижения более точных результатов можно использовать метод корректировки полученных значений.

Для реализации указанного метода следует ввести в расчетные выражения (7)–(9) коэффициенты коррекции, определяемые из разности экспериментальных и расчетных данных.

Существует много способов определения и форм представления соотношений для коэффициентов коррекции. Однако наилучшим из них следует считать введение в расчетные выражения коэффициентов коррекции, которые можно использовать сразу для нескольких упругих свойств.

Так, самой перспективной является связь между формулами (8) и (9), описываемая выражением

$$\alpha = \sqrt{\frac{1}{\beta\rho}}. \quad (12)$$

Исходя из того, что расчетные значения скорости звука должны быть максимально близки к экспериментальным, получаем

$$\alpha_{corr} = \alpha_{exp},$$

где  $\alpha_{corr}$  — желательное значение скорректированной расчетной скорости звука в жидкости, которое надо найти;  $\alpha_{exp}$  — экспериментальные значения.



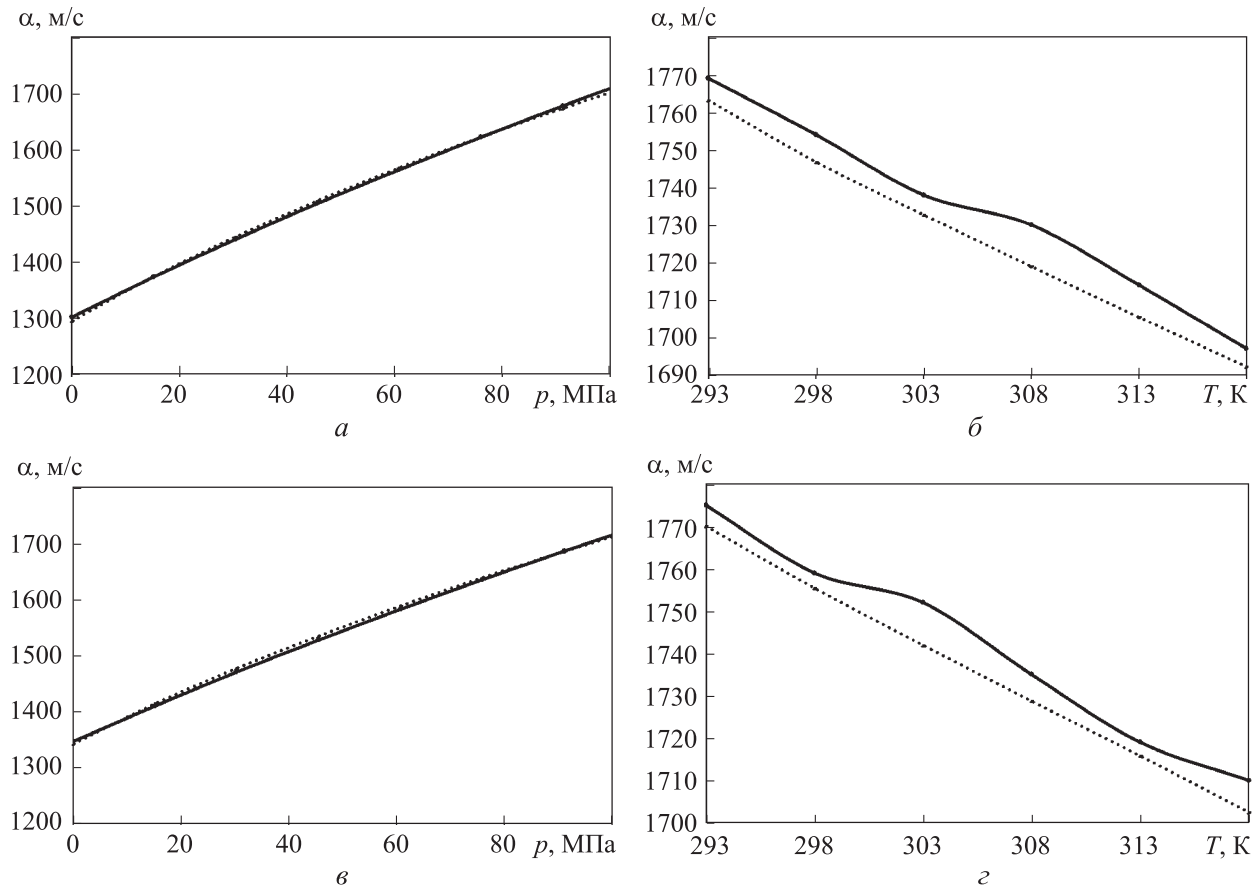


Рис. 2. Расчетные (—) и экспериментальные (.....) зависимости скорости звука  $\alpha$  в ДТ (а, б) и БТ (в, г) от параметров состояния:  
 а, в — давления при температуре топлива  $T = 313$  К; б, г — температуры при давлении топлива  $p = 101$  МПа

Тогда, учитывая выражения (8), (12) и преобразуя их, запишем

$$\alpha_{exp} = (k\rho\beta)^{-\frac{1}{2}}. \tag{13}$$

Коэффициенты коррекции (13) можно представить как

$$k = \frac{1}{\alpha_{exp}^2 \rho \beta}. \tag{14}$$

С учетом выражений (12) и (14) конечная форма соотношения для поиска скорректированных значений скорости звука в жидкости приобретает вид

$$\alpha_{corr} = \frac{1}{\sqrt{k}} \alpha. \tag{15}$$

Аналогично получаем выражение для поиска скорректированного значения коэффициента сжимаемости

$$\beta_{corr} = \frac{1}{\alpha_{corr}^2 \rho}. \tag{16}$$

Форма выведенных расчетных выражений для определения коэффициента коррекции проста и удобна при автоматизации обработки большого объема экспериментальных данных по специальной программе. Метод коррекции вычислений упругих свойств способствует созданию базы рекомендуемых коэффициентов УС для традиционных, альтернативных топлив и других жидкостей.

Для практического удобства расчета констант УС необходимо выполнить обработку массивов коэффициентов коррекции с получением функциональных зависимостей от параметров состояния. Эти зависимости ищем как аппроксимации коэффициентов  $k$  от температуры и давления в виде полинома

$$k = k_0 + k_1 T + k_2 T^2 + \dots + k_n T^n, \tag{17}$$

где

$$k_n = k_{0n} + k_{1n} p + k_{2n} p^2 + \dots + k_{mn} p^m. \tag{18}$$

Процедуру выведения выражений вида (17), (18) можно описать следующим образом:

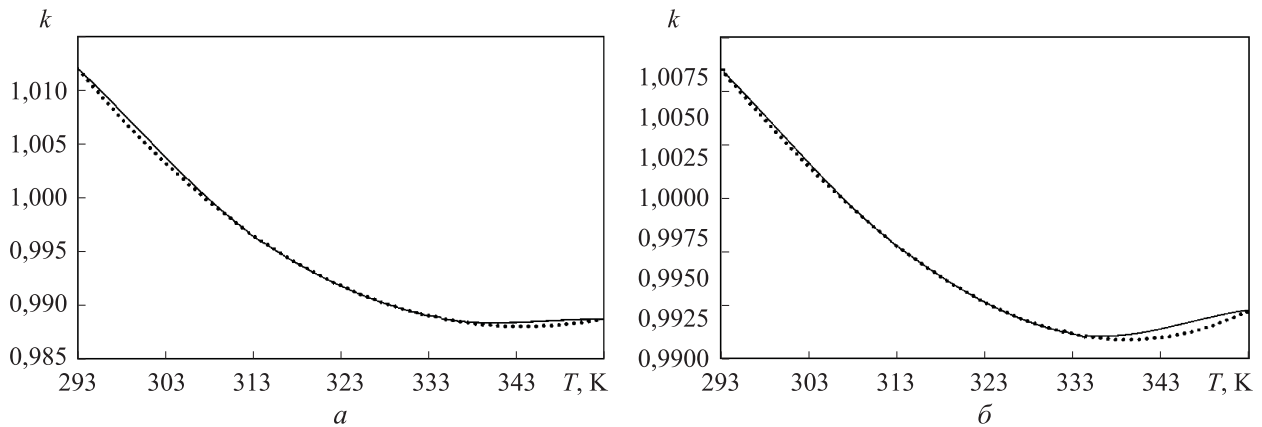


Рис. 3. Расчетные (—) и аппроксимирующие (.....) зависимости коэффициента поправки  $k$  от температуры  $T$  метиллаурата при  $p = 90$  МПа (а) и этиллаурата при  $p = 120$  МПа (б)

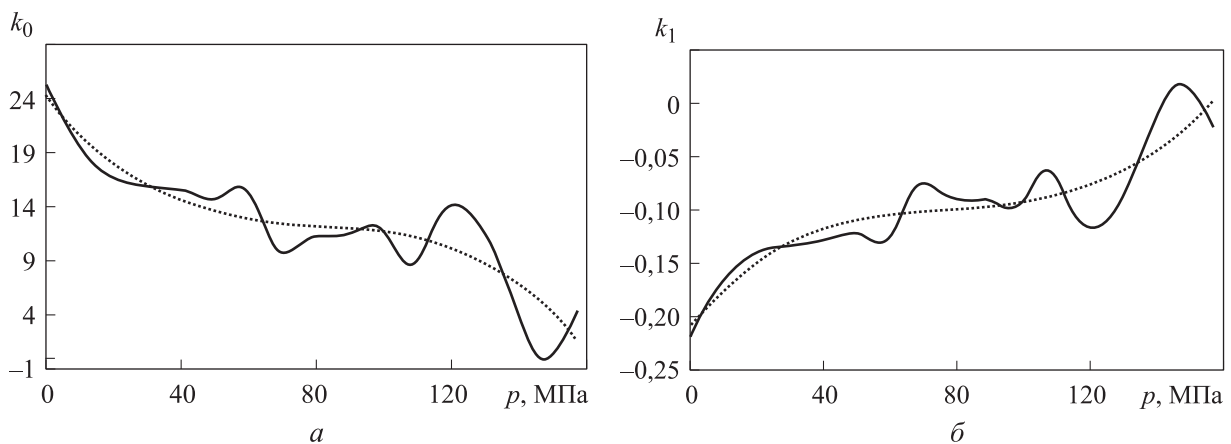


Рис. 4. Расчетные (—) и аппроксимирующие (.....) зависимости коэффициентов полинома (17)  $k_0$  (а) и  $k_1$  (б) от давления  $p$  при обработке данных по скорости звука в КЖ Ravenol

- после получения массивов расчетных коэффициентов коррекции с помощью выражения (14) ищутся их аппроксимации в зависимости от температуры в форме полинома (17) для каждого рассматриваемого давления жидкости; пример аппроксимации для метиллаурата [39] при давлении  $p = 90$  МПа приведен на рис. 3, а, для этиллаурата [39] при  $p = 120$  МПа — на рис. 3, б;

- коэффициенты полиномов  $k_n$  сортируются и представляются в виде массива, значения компонентов которого зависят от давления; аппроксимация получаемой зависимости для коэффициентов  $k_n$  ищется в виде кривой, описываемой полиномом (18); пример аппроксимации коэффициентов  $k_0$  и  $k_1$  полинома (17) для КЖ Ravenol [44] приведен на рис. 4, а и б.

Аналогичным образом получены соотношения в форме (17), (18) для других чистых топлив и жидкостей. Рекомендации по наполнению полиномов (17), (18) приведены в табл. 2.

Получаемые при этом выражения ограничены четвертой (18) и третьей (17) степенями полиномов.

Размерность рекомендуемых коэффициентов обусловлена стремлением сохранения точности расчетных значений коэффициентов коррекции, но структура выражений (17), (18) удобна для решения практических задач. Она отвечает необходимым требованиям по универсальности, простоте и удобству преобразований, особенно при автоматизации расчетного процесса.

Как уже отмечалось, результатом введения в расчетные выражения коэффициентов коррекции служит корректировка значений упругих свойств. На рис. 5 приведены экспериментальные, рассчитанные по выражению (8) и скорректированные по формуле (15) с применением соотношений (17), (18) зависимости скорости звука в ДТ S250 от его температуры при давлении  $p = 150$  МПа [30].

Таблица 2

Значения корректирующих коэффициентов выражения (16) и (17), рекомендуемые для расчета чистых топлив и жидкостей при различных значениях температуры и давления

Свойство	Тип жидкости (стандарт)	T, К	p, МПа	Корректирующие коэффициенты			
				$k_{0i}$	$k_{1i}$	$k_{2i}$	$k_{3i}$
SV	ДТ S250 [30]	293...373	0,1...150	$k_{00} = 1,1579124;$	$k_{10} = -7,3615989 \cdot 10^{-3};$	$k_{20} = 3,9438795 \cdot 10^{-5};$	$k_{30} = -5,5174183 \cdot 10^{-8};$
				$k_{01} = -6,1362086 \cdot 10^{-8};$	$k_{11} = 5,9205729 \cdot 10^{-10};$	$k_{21} = -1,8877959 \cdot 10^{-12};$	$k_{31} = 1,9379018 \cdot 10^{-15};$
				$k_{02} = 1,1940716 \cdot 10^{-15};$	$k_{12} = -1,0848914 \cdot 10^{-17};$	$k_{22} = 3,2603108 \cdot 10^{-20};$	$k_{32} = -3,1569276 \cdot 10^{-23};$
				$k_{03} = -8,7333378 \cdot 10^{-24};$	$k_{13} = 7,7404878 \cdot 10^{-32};$	$k_{23} = -2,2600988 \cdot 10^{-28};$	$k_{33} = 2,1197937 \cdot 10^{-31};$
	$k_{04} = 2,0490294 \cdot 10^{-32};$	$k_{14} = -1,774846 \cdot 10^{-34}$	$k_{24} = 5,0389612 \cdot 10^{-37}$	$k_{34} = -4,5509115 \cdot 10^{-40}$			
	ДТ S300 [30]	293...373	0,1...150	$k_{00} = 2,4930618;$	$k_{10} = -1,5611804 \cdot 10^{-2};$	$k_{20} = 5,3253305 \cdot 10^{-5};$	$k_{30} = -5,9093278 \cdot 10^{-8};$
				$k_{01} = 1,6642485 \cdot 10^{-8};$	$k_{11} = 9,9262948 \cdot 10^{-11};$	$k_{21} = 1,5089688 \cdot 10^{-13};$	$k_{31} = -4,7735795 \cdot 10^{-17};$
				$k_{02} = -1,9558071 \cdot 10^{-15};$	$k_{12} = 1,7085043 \cdot 10^{-17};$	$k_{22} = -4,9773441 \cdot 10^{-20};$	$k_{32} = 4,9181831 \cdot 10^{-23};$
				$k_{03} = 3,3344254 \cdot 10^{-23};$	$k_{13} = -2,9473143 \cdot 10^{-25};$	$k_{23} = 8,6873521 \cdot 10^{-28};$	$k_{33} = -8,6074702 \cdot 10^{-31};$
	$k_{04} = -1,6692013 \cdot 10^{-31}$	$k_{14} = 1,4759175 \cdot 10^{-33}$	$k_{24} = -4,3484844 \cdot 10^{-36}$	$k_{34} = 4,2925639 \cdot 10^{-39}$			
	Метанол [37]	253...353	0,1...30	$k_{00} = -0,9876368;$	$k_{10} = 0,01342905;$	$k_{20} = -2,2378759 \cdot 10^{-5};$	-
				$k_{01} = 1,69198 \cdot 10^{-8}$	$k_{11} = -1,15887 \cdot 10^{-10}$	$k_{21} = 1,96025 \cdot 10^{-13}$	-
Этанол [37]	253...353	0,1...30	$k_{00} = -0,7560954;$	$k_{10} = 1,1867474 \cdot 10^{-2};$	$k_{20} = -1,9795283 \cdot 10^{-5};$	-	
			$k_{01} = 1,56566 \cdot 10^{-8}$	$k_{11} = -1,0656 \cdot 10^{-10}$	$k_{21} = 1,79294 \cdot 10^{-13}$	-	
Пропанол [37]	253...353	0,1...30	$k_{00} = -0,60736;$	$k_{10} = 1,0847593 \cdot 10^{-2};$	$k_{20} = -1,8043106 \cdot 10^{-5};$	-	
			$k_{01} = 2,10414 \cdot 10^{-8};$	$k_{11} = -1,41836 \cdot 10^{-10};$	$k_{21} = 2,293873 \cdot 10^{-13};$	-	
			$k_{02} = -3,346 \cdot 10^{-16}$	$k_{12} = 2,23 \cdot 10^{-18}$	$k_{22} = -3,4414 \cdot 10^{-21}$	-	
Бутанол [37]	253...353	0,1...30	$k_{00} = -0,6592282;$	$k_{10} = 1,1189636 \cdot 10^{-2};$	$k_{20} = -1,8598733 \cdot 10^{-5};$	-	
			$k_{01} = 2,05133 \cdot 10^{-8};$	$k_{11} = -1,3778664 \cdot 10^{-10};$	$k_{21} = 2,2278 \cdot 10^{-13};$	-	
			$k_{02} = -2,968 \cdot 10^{-16}$	$k_{12} = -2,967 \cdot 10^{-21}$	$k_{22} = -2,967 \cdot 10^{-21}$	-	
Метиллаурат [39]	293...353	0,1...90	$k_{00} = -5,94732411;$	$k_{10} = 6,5646065 \cdot 10^{-2};$	$k_{20} = -2,0712524 \cdot 10^{-4};$	$k_{30} = 2,1870685 \cdot 10^{-7};$	
			$k_{01} = 0,1473866 \cdot 10^{-6};$	$k_{11} = -1,3989665 \cdot 10^{-9};$	$k_{21} = 4,4259457 \cdot 10^{-12};$	$k_{31} = -4,698696 \cdot 10^{-15};$	
			$k_{02} = -2,4356064 \cdot 10^{-16}$	$k_{12} = 2,8250969 \cdot 10^{-18}$	$k_{22} = -1,04172 \cdot 10^{-20}$	$k_{32} = 1,267173 \cdot 10^{-23}$	
Этилаурат [39]	293...353	0,1...120	$k_{00} = 12,1632221;$	$k_{10} = -0,1022893;$	$k_{20} = 3,1120665 \cdot 10^{-4};$	$k_{30} = -3,1382992 \cdot 10^{-7};$	
			$k_{01} = -0,5957831 \cdot 10^{-6};$	$k_{11} = 5,533057 \cdot 10^{-9};$	$k_{21} = 1,7451059 \cdot 10^{-14};$	$k_{31} = 1,7451059 \cdot 10^{-14};$	
			$k_{02} = 1,21641532 \cdot 10^{-14};$	$k_{12} = -1,12705796 \cdot 10^{-16};$	$k_{22} = -3,5474819 \cdot 10^{-19};$	$k_{32} = -3,5474819 \cdot 10^{-22};$	
			$k_{03} = -6,5383552 \cdot 10^{-23}$	$k_{13} = 6,0623217 \cdot 10^{-25}$	$k_{23} = -1,8682375 \cdot 10^{-27}$	$k_{33} = 1,9116551 \cdot 10^{-30}$	
н-Нонан [40]	283...473	1...390	$k_{00} = -1,6940674;$	$k_{10} = 2,2467747 \cdot 10^{-2};$	$k_{20} = -6,0563114 \cdot 10^{-5};$	$k_{30} = 5,4344443 \cdot 10^{-8};$	
			$k_{01} = 3,8362995 \cdot 10^{-8};$	$k_{11} = -3,24859297 \cdot 10^{-10};$	$k_{21} = 8,8085871 \cdot 10^{-13};$	$k_{31} = -8,3430347 \cdot 10^{-16};$	
			$k_{02} = -2,38211216 \cdot 10^{-16};$	$k_{12} = 2,037097 \cdot 10^{-18};$	$k_{22} = -5,6160196 \cdot 10^{-21};$	$k_{32} = 5,5834803 \cdot 10^{-24};$	
			$k_{03} = 6,449227 \cdot 10^{-25};$	$k_{13} = -5,568692 \cdot 10^{-27};$	$k_{23} = 1,565596 \cdot 10^{-29};$	$k_{33} = -1,6148088 \cdot 10^{-32};$	
$k_{04} = -6,56988 \cdot 10^{-34}$	$k_{14} = 5,715 \cdot 10^{-36}$	$k_{24} = -1,63 \cdot 10^{-38}$	$k_{34} = 1,7159 \cdot 10^{-41}$				

Окончание табл. 2

Свой-ство	Тип жидкости (стандарт)	Т, К	p, МПа	Корректирующие коэффициенты		
				$k_{0i}$	$k_{1i}$	$k_{3i}$
SV	Толуол [41]	283...473	30...390	$k_{00} = -0,3567763;$	$k_{20} = -2,5034431 \cdot 10^{-5};$ $k_{21} = 1,6594334 \cdot 10^{-13};$ $k_{22} = -3,19351 \cdot 10^{-22};$ $k_{23} = 1,65 \cdot 10^{-31}$	$k_{30} = 1,98912 \cdot 10^{-8};$ $k_{31} = -1,252510^{-16};$ $k_{32} = 2,0671 \cdot 10^{-25};$ $k_{33} = -6 \cdot 10^{-35}$
				$k_{01} = 1,0076498 \cdot 10^{-8};$		
				$k_{02} = -2,5572537 \cdot 10^{-17};$		
				$k_{03} = 2,193991 \cdot 10^{-26}$		
D	КЖ (ISO 4113) [42]	313...373	0,1...150	$k_{00} = 26,9670474;$	$k_{20} = 7,3594389 \cdot 10^{-4};$ $k_{21} = 6,6292851 \cdot 10^{-12};$ $k_{22} = -4,0200663 \cdot 10^{-19};$ $k_{23} = 4,3484131 \cdot 10^{-27};$ $k_{24} = -1,395497 \cdot 10^{-35}$	$k_{30} = -7,4938708 \cdot 10^{-7};$ $k_{31} = -6,1429001 \cdot 10^{-15};$ $k_{32} = 3,8730848 \cdot 10^{-22};$ $k_{33} = -4,2063741 \cdot 10^{-30};$ $k_{34} = 1,3515055 \cdot 10^{-38}$
				$k_{01} = 2,7807074 \cdot 10^{-7};$		
				$k_{02} = -1,5839952 \cdot 10^{-14};$		
				$k_{03} = 1,701851 \cdot 10^{-22};$		
D	КЖ (ISO 4113) [42]	313...373	0,1...150	$k_{04} = -5,4500201 \cdot 10^{-31}$	$k_{20} = 4,1000172 \cdot 10^{-4};$ $k_{21} = -2,6730647 \cdot 10^{-11};$ $k_{22} = 5,5133426 \cdot 10^{-19};$ $k_{23} = -4,2195702 \cdot 10^{-27};$ $k_{24} = 1,1068398 \cdot 10^{-35}$	$k_{30} = -3,9581833 \cdot 10^{-7};$ $k_{31} = 2,5824461 \cdot 10^{-14};$ $k_{32} = -5,3413056 \cdot 10^{-22};$ $k_{33} = 4,0937748 \cdot 10^{-30};$ $k_{34} = -1,0752533 \cdot 10^{-38}$
				$k_{00} = 17,3925034;$		
				$k_{01} = -1,0544239 \cdot 10^{-6};$		
				$k_{02} = 2,1579623 \cdot 10^{-14};$		
SV	КЖ Normfluid [43]	283...423	0,1...200	$k_{03} = -1,6461091 \cdot 10^{-22};$	$k_{20} = -1,4229763 \cdot 10^{-7};$ $k_{21} = -8,2022913 \cdot 10^{-15};$ $k_{22} = 4,6606507 \cdot 10^{-23};$ $k_{23} = 2,2056614 \cdot 10^{-32}$	-
				$k_{04} = 4,305145 \cdot 10^{-31}$		
				$k_{00} = 1,2232386;$		
				$k_{01} = -3,4688605 \cdot 10^{-9};$		
SV	КЖ Ravenol [44]	300...371	0,1...196	$k_{02} = 2,1579623 \cdot 10^{-14};$	$k_{20} = 6,2959623 \cdot 10^{-4};$ $k_{21} = -1,1339813 \cdot 10^{-11};$ $k_{22} = 1,3168781 \cdot 10^{-19};$ $k_{23} = -5,5057949 \cdot 10^{-28}$	$k_{30} = -6,2775488 \cdot 10^{-7};$ $k_{31} = 1,1579727 \cdot 10^{-14};$ $k_{32} = -1,3358494 \cdot 10^{-22};$ $k_{33} = 5,5973 \cdot 10^{-31}$
				$k_{03} = -9,3161998 \cdot 10^{-27}$		
				$k_{00} = 24,2835187;$		
				$k_{01} = -4,0038955 \cdot 10^{-7};$		
SV	Чистая вода [46]	273...473	1...400	$k_{02} = 4,7059963 \cdot 10^{-15};$	$k_{20} = -3,134928 \cdot 10^{-5};$ $k_{21} = 9,1653202 \cdot 10^{-13};$ $k_{22} = -5,9242018 \cdot 10^{-21};$ $k_{23} = 1,7751715 \cdot 10^{-29};$ $k_{24} = -1,89976 \cdot 10^{-38}$	$k_{30} = 2,8397863 \cdot 10^{-8};$ $k_{31} = -8,0547416 \cdot 10^{-16};$ $k_{32} = 5,2291673 \cdot 10^{-24};$ $k_{33} = -1,575767 \cdot 10^{-32};$ $k_{34} = 1,6988 \cdot 10^{-41}$
				$k_{03} = -1,9604853 \cdot 10^{-23}$		
				$k_{00} = -0,4144517;$		
				$k_{01} = 4,4939533 \cdot 10^{-8};$		
SV	Хлоргексан [47]	298...433	0,1...100	$k_{02} = -2,9034703 \cdot 10^{-16};$	$k_{20} = 7,3504544 \cdot 10^{-4};$ $k_{21} = -3,2339749 \cdot 10^{-11};$ $k_{22} = 6,1851141 \cdot 10^{-19};$ $k_{23} = -3,344929 \cdot 10^{-27}$	$k_{30} = -6,7849377 \cdot 10^{-7};$ $k_{31} = 3,0583 \cdot 10^{-14};$ $k_{32} = -5,8777843 \cdot 10^{-22};$ $k_{33} = 3,18272 \cdot 10^{-30}$
				$k_{03} = 8,533563 \cdot 10^{-25};$		
				$k_{00} = 32,0437648;$		
				$k_{01} = -1,3058172 \cdot 10^{-6};$		
SV	Дизель-децилфталат [48]	298...413	1...140	$k_{02} = 2,4743927 \cdot 10^{-14};$	$k_{20} = 1,0322396 \cdot 10^{-4};$ $k_{21} = -2,4951284 \cdot 10^{-12};$ $k_{22} = 8,7489791 \cdot 10^{-20};$ $k_{23} = -1,1711912 \cdot 10^{-27};$ $k_{24} = 4,8463705 \cdot 10^{-36}$	$k_{30} = -1,0724822 \cdot 10^{-7};$ $k_{31} = 2,3796879 \cdot 10^{-15};$ $k_{32} = -8,0327988 \cdot 10^{-23};$ $k_{33} = 1,0668622 \cdot 10^{-30};$ $k_{34} = -4,4039567 \cdot 10^{-39}$
				$k_{03} = -1,3352472 \cdot 10^{-22}$		
				$k_{00} = 4,3319111;$		
				$k_{01} = -9,7850786 \cdot 10^{-8};$		

Корректирующие коэффициенты, получаемые на основе рекомендаций, приведенных в табл. 2, при рассмотрении заданных диапазонов температуры и давления для конкретных жидкостей позволяют найти расчетные значения скорости звука, коэффициента сжимаемости и плотности, наиболее близкие к экспериментальным. Как видно из рис. 5, использование поправочных коэффициентов в форме (17), (18) значительно снижает расхождение экспериментальных и расчетных данных.

Аналогичная картина характерна для других топлив и жидкостей, обработанных по приведенному методу (см. табл. 2). Применимость метода по поиску корректирующих коэффициентов доказана для традиционных, альтернативных топлив и других жидкостей. Также в табл. 2 приведены рекомендации для хлоргексана [47] и диизодецилфталата [48].

Метод получения зависимостей типа (17), (18) относительно прост, хотя и несколько трудоемок. Его можно реализовать как расчетную программу, которая при чтении входного файла экспериментальных данных даст соответствующие рекомендации для разных жидкостей.

Способ коррекции расчетных значений упругих свойств для выбранной формы УС легко встроить в существующие математические модели быстропротекающих процессов топливоподачи любой сложности. Учет влияния параметров состояния позволяет полноценно учитывать нагревание топлива в насосе высокого давления, а также при дросселировании в форсунке.

## Выводы

1. Выбранная форма УС (6) отвечает предъявляемым к ней требованиям: простоте, удобству с точки зрения прямых и обратных пересчетов, возможности применения в любых математических моделях, описывающих быстропротекающий процесс топливоподачи при высоких и ультравысоких давлениях. Выражение (6) и построенные на его базе уравнения (7)–(9) хорошо описывают упругие свойства топлив и других жидкостей.

2. Разработанный способ поиска констант УС (6) применим в форме полиномов (10), (11), позволяющих аппроксимировать константы в функции температуры. Метод прост и не требует реализации сложных математических зависимостей. Точность поиска констант

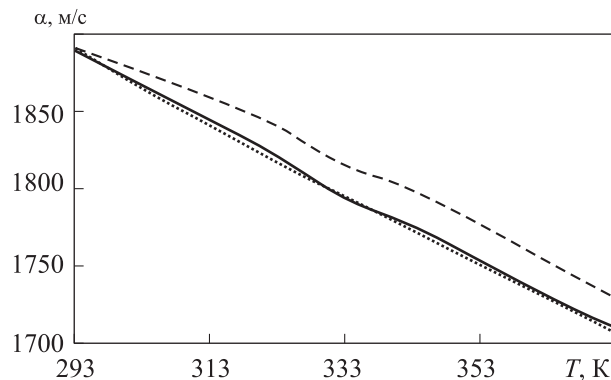


Рис. 5. Расчетная (---), экспериментальная (.....) и скорректированная (—) зависимости скорости звука  $\alpha$  в ДТ S250 от его температуры  $T$  при давлении  $p = 150$  МПа

обеспечена использованием экспериментальных данных. Применение такого способа дает возможность относительно быстро создать широкую базу данных, пригодных для практических расчетов.

3. Предложен метод уточнения расчетных значений упругих свойств. Он основан на введении универсального коэффициента коррекции в выражения для расчета скорости звука и коэффициента сжимаемости (15), (16) в форме полиномов (17), (18). Получаемые выражения математически просты и пригодны для использования в существующих математических моделях для описания процессов топливоподачи в дизелях. Применение алгоритма коррекции расчетных значений упругих свойств топлив и жидкостей позволяет значительно снизить расхождение расчетных и экспериментальных данных и учитывает влияние параметров состояния. Последнее важно ввиду того, что процессы топливоподачи в современных топливных системах сопровождаются значительным нагревом топлива при сжатии в насосе высокого давления и при дросселировании в форсунке. Метод предназначен для практических расчетов топливных систем с высокими и ультравысокими давлениями.

4. Даны рекомендации по поиску и использованию констант УС (6) в виде полиномов (10), (11) в зависимости от температуры для традиционных, альтернативных топлив и других жидкостей.

5. Приведены рекомендации по определению корректирующих коэффициентов в виде полиномов (17), (18) в зависимости от давления и температуры традиционных, альтернативных топлив и других жидкостей.

## Литература

- [1] Herrmann O., Nakagawa M., Kenhard M. et al. Ultra high pressure and enhanced multiple injection — potentials for the diesel engine and challenge for the fuel injection system. In: *Fuel Systems for IC Engine*. Woodhead, 2012, pp. 103–114, doi: <https://doi.org/10.1533/9780857096043.4.103>
- [2] Kendlbacher C., Müller P., Bernhaupt M. et al. Large engine injection systems for future emission legislations. *CIMAC World Cong. on Combustion Engine Technology for Ship Propulsion, Power Generation, Rail Traction*, 2010, 50 p.
- [3] Pflaum S., Wloka J., Wachtmeister G. Emission reduction potential of 3000 bar Common Rail Injection and development trends. *CIMAC World Cong. on Combustion Engine Technology for Ship Propulsion, Power Generation, Rail Traction*, 2010, 195 p.
- [4] Nishida K., Zhu J., Leng X. et al. Effects of micro-hole nozzle and ultra-high injection pressure on air entrainment, liquid penetration, flame lift-off and soot formation of diesel spray flame. *Int. J. Engine Res.*, 2017, vol. 18, no. 1–2, pp. 51–65, doi: <https://doi.org/10.1177/1468087416688805>
- [5] Wang X., Huang Z., Zhang W. et al. Effects of ultra-high injection pressure and micro-hole nozzle on flame structure and soot formation of impinging diesel spray. *Appl. Energy.*, 2011, vol. 88, no. 5, pp. 1620–1628, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.11.035>
- [6] Palani Y., Devarajan C., Manickam D. et al. Performance and emission characteristics of bio-diesel-blend in diesel engine: a review. *Environ. Eng. Res.*, 2020, vol. 27, no. 1, art. 200338, doi: <https://doi.org/10.4491/eer.2020.338>
- [7] Londhekar Atul G., Kongre S.C. Effects of different additives on performance and emission of biodiesel fuelled compression ignition engine. *Int. J. Sci. Res.*, 2017, vol. 6, no. 2, pp. 1947–1952.
- [8] Knothe G., Razon L.F. Biodiesel fuels. *Prog. Energy Combust. Sci.*, 2017, vol. 58, pp. 36–59, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.pecs.2016.08.001>
- [9] Hoekman S.K., Broch A., Robbins C. et al. Review of biodiesel composition, properties, and specifications. *Renew. Sust. Energ. Rev.*, 2012, vol. 16, no. 1, pp. 143–169, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.07.143>
- [10] Грехов Л.В., Габитов И.И., Неговора А.В. *Конструкция, расчет и технический сервис топливной аппаратуры современных дизелей*. Москва, Легион-Автодата, 2013. 273 с.
- [11] Masoudi M., Miri R., Hellevang H. et al. Modified PC-SAFT characterization technique for modeling asphaltenic crude oil phase behavior. *Fluid Phase Equilib.*, 2020, vol. 513, art. 112545, doi: <https://doi.org/10.1016/j.fluid.2020.112545>
- [12] Rowane A.J., Babu Mahesh V., Rokni H.B. et al. A. Effect of composition, temperature, and pressure on the viscosities and densities of three diesel fuels. *J. Chem. Eng. Data*, 2019, vol. 64, no. 12, pp. 5529–5547, doi: <https://doi.org/10.1021/acs.jced.9b00652>
- [13] Alavianmehr M.V., El-Shaikh M., Akbari F. et al. A new equation of state for modeling thermodynamic properties of some fatty acids alkyl esters, methyl ester-based biodiesels and their blends. *Fluid Phase Equilib.*, 2017, vol. 442, pp. 53–61, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.fluid.2017.03.004>.
- [14] Kolev N.I. *Multiphase flow dynamics 4*. Springer, 2011. 333 p.
- [15] SIEMENS VDO. *Automotive, Diesel Systems*. AT PT DS CR EIN. Regensburg, 2003. 118 p.
- [16] Kielczynski P., Ptasznik S., Szalewski M. et al. Thermophysical properties of rapeseed oil methyl esters (RME) at high pressures and various temperatures evaluated by ultrasonic methods. *Biomass Bioenergy*, 2017, vol. 107, pp. 113–121, doi: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2017.09.015>.
- [17] Peleties F., Segovia J.J., Trusler J.P.M. et al. Thermodynamic properties and equation of state of liquid di-isodecyl phthalate at temperature between (273 and 423) K and at pressures up to 140MPa. *The J. of Chem. Thermodyn.*, 2010, vol. 42, no. 5, pp. 631–639, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jct.2009.12.002>
- [18] Александров И.С., Григорьев Б.А., Герасимов А.А. Прогнозирование фазового поведения технологических фракций нефти на основе нового PC-SAFT-уравнения состояния с использованием искусственных нейронных сетей. *Вести газовой науки*, 2018, № 5, с. 4–11.
- [19] Münster A. *Classical thermodynamics*. Wiley, 1970. 387 p.

- [20] Redlich O., Kwong J.N. On the thermodynamics of solutions. An equation of state. Fugacities of gaseous solutions. *Chem. Rev.*, 1949, vol. 44, no. 1, pp. 233–244, doi: <https://doi.org/10.1021/cr60137a013>
- [21] Жердев А.А. Определение термодинамических свойств хладагентов с помощью уравнения состояния Редлиха-Квонга. *Вестник международной академии холода*, 2002, № 2, с. 30–32.
- [22] Bychkov E.G., Makarov B.A., Yakovlev V.I. et al. Comparative analysis of equations of state for calculating the thermodynamic properties of a vapor-liquid multicomponent refrigerant blend comprising the working fluid of a low-temperature throttling refrigeration unit. *Chem. Pet. Eng.*, 2020, vol. 56, no. 5–6, pp. 393–402, doi: <https://doi.org/10.1007/s10556-020-00786-9>
- [23] Калиновский Ю.В., Садреев Э.А. Расчет влагосодержания основных компонентов природного газа и их растворимостей в воде по кубическим уравнениям состояния. *Вестник газовой науки*, 2012, № 11, с. 61–75.
- [24] Tammann G. *Ueber die Beziehungen zwischen den inneren Kraften und Eigenschaften der Losungen*. L. Voss, 1907.
- [25] Schaschke C., Fletcher I., Glen N. Density and viscosity measurement of diesel fuels at combined high pressure and elevated temperature. *Processes*, 2013, vol. 1, no. 2, pp. 30–48, doi: <https://doi.org/10.3390/pr1020030>
- [26] Cole R.H. *Underwater explosions*. Princeton Univ. Press, 1948. 496 p.
- [27] Zhao J., Grekhov L., Onishchenko D. et al. Methods for calculating fuel heating in electrically controlled injectors of Common Rail diesel systems. *Fuel*, 2021, vol. 305, art. 121526, doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.121526>
- [28] Грехов Л.В., Иващенко Н.А., Марков В.А. *Топливная аппаратура и системы управления дизелей*. Москва, Легион-Автодата, 2005. 344 с.
- [29] Zhao J., Lu X., Grekhov L. Experimental study on the fuel heating at the nozzle of the high pressure common-rail injector. *Fuel*, 2021, vol. 283, art. 119281, doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.119281>
- [30] Daridon J.L., Lagrabette A., Lagourette B. Speed of sound, density, and compressibilities of heavy synthetic cuts from ultrasonic measurements under pressure. *J. Chem. Phys.*, 1998, vol. 30, no. 5, pp. 607–623, doi: <https://doi.org/10.1006/jcht.1997.0330>
- [31] Dzida M., Prusakiewicz P. The effect of temperature and pressure on the physicochemical properties of petroleum diesel oil and biodiesel. *Fuel*, 2008, vol. 87, no. 10–11, pp. 1941–1948, doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2007.10.010>
- [32] Giuliano Albo P.A., Lago S. Experimental speed-of-sound measurements of pure fatty acids methyl ester, mineral diesel and blends in a wide range of temperature and for pressures up to 300MPa. *Fuel*, 2014, vol. 115, pp. 740–748, doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.07.103>
- [33] Кадиата Э.Ч., Славуцкий В.М., Курапин А.В. и др. Сжимаемость пальмового масла и его смесей с дизельным топливом. *iPolytech Journal*, 2018, т. 22, № 10, с. 178–188, doi: <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2018-10-178-188>
- [34] Torres-Jimenez E., Dorado M.P., Kegl B. Experimental investigation on injection characteristics of bioethanol–diesel fuel and bioethanol–biodiesel blends. *Fuel*, 2011, vol. 90, no. 5, pp. 1968–1979, doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2010.11.042>
- [35] Alptekin E., Canakci M. Determination of the density and the viscosities of biodiesel–diesel fuel blends. *Renew. Energy*, 2008, vol. 33, no. 12, pp. 2623–2630, doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2008.02.020>
- [36] Dzida M., Żak A., Ernst S. Thermodynamic and acoustic properties of binary mixtures of alcohols and alkanes. I. Speed of sound in (ethanol+n-heptane) under elevated pressures. *J. Chem. Thermodyn.*, 2005, vol. 37, no. 5, pp. 405–414, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jct.2004.10.001>
- [37] Dávila M.J., Gedanitz H., Span R. Speed of sound measurements of liquid C1–C4 alkanols. *J. Chem. Thermodyn.*, 2016, vol. 93, pp. 157–163, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jct.2015.10.006>
- [38] Dashti H.H., Riazi M.R. Acoustic velocities in petroleum fluids: measurement and prediction. *J. Pet. Sci. Eng.*, 2014, vol. 124, pp. 94–104, doi: <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2014.10.013>
- [39] Habrioux M., Nasri D., Daridon L. Measurement of speed of sound, density compressibility and viscosity in liquid methyl laurate and ethyl laurate up to 200 MPa by using acoustic wave

- sensors. *J. Chem. Thermodyn.*, 2018, vol. 120, pp. 1–12, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jct.2017.12.020>
- [40] Tay W.J., Trusler J.P.M. Density, sound speed and derived thermophysical properties of n-nonane at temperatures between (283.15 and 473.15) K and at pressures up to 390 MPa. *J. Chem. Thermodyn.*, 2018, vol. 124, pp. 107–122, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jct.2018.04.019>
- [41] Dhakal S., Tay W.J., Al Ghafri S.Z.S. et al. Thermodynamic properties of liquid toluene from speed-of-sound measurements at temperatures from 283.15 K to 473.15 K and at pressures up to 390 MPa. *Int. J. Thermophys.*, 2021, vol. 42, no. 12, art. 69, doi: <https://doi.org/10.1007/s10765-021-02917-7>
- [42] Catania A.E., Ferrari A., Spessa E. Temperature variations in the simulation of high pressure injection-system transient flows under cavitation. *Int. J. Heat Mass Transf.*, 2008, vol. 51, no. 7–8, pp. 2090–2107, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2007.11.032>
- [43] Ndiaye E.H.I., Bazile J.-P., Nasri D. et al. High pressure thermophysical characterization of fuel used for testing and calibrating diesel injection systems. *Fuel*, 2012, vol. 98, pp. 288–294, doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2012.04.005>
- [44] Lowe A.R., Jasiok B., Melent'ev V.V. et al. High-temperature and high-pressure thermophysical property measurements and thermodynamic modelling of an international oil standard: RAVENOL diesel rail injector calibration fluid. *Fuel Process. Technol.*, 2020, vol. 199, art. 106220, doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2019.106220>
- [45] Freitas S.V.D., Santos Â., Moita M.-L.C.J. et al. Measurement and prediction of speeds of sound of fatty acid ethyl esters and ethylic biodiesels. *Fuel*, 2013, vol. 108, pp. 840–845, doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.02.041>
- [46] Lin C.W., Trusler J.P.M. The speed of sound and derived thermodynamic properties of pure water at temperatures between (253 and 473) K and at pressures up to 400 MPa. *J. Chem. Phys.*, 2012, vol. 136, no. 9, art. 094511, doi: <https://doi.org/10.1063/1.3688054>
- [47] Shchamialiou A.P., Samuilov V.S., Mosbakh F.M. et al. Densities, speed of sound, and derived thermodynamic properties of toluene, tetradecane, and 1-chlorohexane in the compressed liquid region. *Fluid Phase Equilib.*, 2020, vol. 507, art. 112427, doi: <https://doi.org/10.1016/j.fluid.2019.112427>
- [48] Peleties F., Segovia J.J., Trusler J.P.M. et al. Thermodynamic properties and equation of state of liquid di-isodecyl phthalate at temperature between (273 and 423) K and at pressures up to 140MPa. *J. Chem. Thermodyn.*, 2010, vol. 42, no. 5, pp. 631–639, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jct.2009.12.002>

## References

- [1] Herrmann O., Nakagawa M., Kenhard M. et al. Ultra high pressure and enhanced multiple injection — potentials for the diesel engine and challenge for the fuel injection system. In: *Fuel Systems for IC Engine*. Woodhead, 2012, pp. 103–114, doi: <https://doi.org/10.1533/9780857096043.4.103>
- [2] Kendlbacher C., Müller P., Bernhaupt M. et al. Large engine injection systems for future emission legislations. *CIMAC World Cong. on Combustion Engine Technology for Ship Propulsion, Power Generation, Rail Traction*, 2010, 50 p.
- [3] Pflaum S., Wloka J., Wachtmeister G. Emission reduction potential of 3000 bar Common Rail Injection and development trends. *CIMAC World Cong. on Combustion Engine Technology for Ship Propulsion, Power Generation, Rail Traction*, 2010, 195 p.
- [4] Nishida K., Zhu J., Leng X. et al. Effects of micro-hole nozzle and ultra-high injection pressure on air entrainment, liquid penetration, flame lift-off and soot formation of diesel spray flame. *Int. J. Engine Res.*, 2017, vol. 18, no. 1–2, pp. 51–65, doi: <https://doi.org/10.1177/1468087416688805>
- [5] Wang X., Huang Z., Zhang W. et al. Effects of ultra-high injection pressure and micro-hole nozzle on flame structure and soot formation of impinging diesel spray. *Appl. Energy.*, 2011, vol. 88, no. 5, pp. 1620–1628, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.11.035>
- [6] Palani Y., Devarajan C., Manickam D. et al. Performance and emission characteristics of bio-diesel-blend in diesel engine: a review. *Environ. Eng. Res.*, 2020, vol. 27, no. 1, art. 200338, doi: <https://doi.org/10.4491/eer.2020.338>



- [7] Londhekar Atul G., Kongre S.C. Effects of different additives on performance and emission of biodiesel fuelled compression ignition engine. *Int. J. Sci. Res.*, 2017, vol. 6, no. 2, pp. 1947–1952.
- [8] Knothe G., Razon L.F. Biodiesel fuels. *Prog. Energy Combust. Sci.*, 2017, vol. 58, pp. 36–59, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.pecs.2016.08.001>
- [9] Hoekman S.K., Broch A., Robbins C. et al. Review of biodiesel composition, properties, and specifications. *Renew. Sust. Energ. Rev.*, 2012, vol. 16, no. 1, pp. 143–169, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.07.143>
- [10] Grekhov L.V., Gabitov I.I., Negovora A.V. *Konstruktsiya, raschet i tekhnicheskiy servis toplivnoy apparatury sovremennykh dizeley* [Design, calculation and technical service of fuel injection equipment of modern diesels]. Moscow, Legion-Avtodata Publ., 2013. 273 p. (In Russ.).
- [11] Masoudi M., Miri R., Hellevang H. et al. Modified PC-SAFT characterization technique for modeling asphaltenic crude oil phase behavior. *Fluid Phase Equilib.*, 2020, vol. 513, art. 112545, doi: <https://doi.org/10.1016/j.fluid.2020.112545>
- [12] Rowane A.J., Babu Mahesh V., Rokni H.B. et al. A. Effect of composition, temperature, and pressure on the viscosities and densities of three diesel fuels. *J. Chem. Eng. Data*, 2019, vol. 64, no. 12, pp. 5529–5547, doi: <https://doi.org/10.1021/acs.jced.9b00652>
- [13] Alavianmehr M.V., El-Shaikh M., Akbari F. et al. A new equation of state for modeling thermodynamic properties of some fatty acids alkyl esters, methyl ester-based biodiesels and their blends. *Fluid Phase Equilib.*, 2017, vol. 442, pp. 53–61, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.fluid.2017.03.004>
- [14] Kolev N.I. *Multiphase flow dynamics 4*. Springer, 2011. 333 p.
- [15] SIEMENS VDO. *Automotive, Diesel Systems*. AT PT DS CR EIN. Regensburg, 2003. 118 p.
- [16] Kiełczyński P., Ptasznik S., Szalewski M. et al. Thermophysical properties of rapeseed oil methyl esters (RME) at high pressures and various temperatures evaluated by ultrasonic methods. *Biomass Bioenergy*, 2017, vol. 107, pp. 113–121, doi: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2017.09.015>
- [17] Peleties F., Segovia J.J., Trusler J.P.M. et al. Thermodynamic properties and equation of state of liquid di-isodecyl phthalate at temperature between (273 and 423) K and at pressures up to 140MPa. *The J. of Chem. Thermodyn.*, 2010, vol. 42, no. 5, pp. 631–639, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jct.2009.12.002>
- [18] Aleksandrov I.S., Grigor'yev B.A., Gerasimov A.A. Predicting phase behavior of technological oil fractions on basis of a new PC-SAFT equation of state and artificial neural networks. *Vesti gazovoy nauki*, 2018, no. 5, pp. 4–11. (In Russ.).
- [19] Münster A. *Classical thermodynamics*. Wiley, 1970. 387 p.
- [20] Redlich O., Kwong J.N. On the thermodynamics of solutions. An equation of state. Fugacities of gaseous solutions. *Chem. Rev.*, 1949, vol. 44, no. 1, pp. 233–244, doi: <https://doi.org/10.1021/cr60137a013>
- [21] Zherdev A.A. Determination of thermodynamic properties of refrigerants with the help of the equation of state of Redlich-Quong. *Vestnik mezhdunarodnoy akademii kholoda* [Journal of International Academy of Refrigeration], 2002, no. 2, pp. 30–32. (In Russ.).
- [22] Bychkov E.G., Makarov B.A., Yakovlev V.I. et al. Comparative analysis of equations of state for calculating the thermodynamic properties of a vapor-liquid multicomponent refrigerant blend comprising the working fluid of a low-temperature throttling refrigeration unit. *Chem. Pet. Eng.*, 2020, vol. 56, no. 5–6, pp. 393–402, doi: <https://doi.org/10.1007/s10556-020-00786-9>
- [23] Kalinovskiy Yu.V., Sadreev E.A. Calculation of the moisture content of the main components of natural gas and their solubility in water using cubic equations of state. *Vesti gazovoy nauki*, 2012, no. 11, pp. 61–75. (In Russ.).
- [24] Tammann G. *Ueber die Beziehungen zwischen den inneren Krafte und Eigenschaften der Losungen*. L. Voss, 1907.
- [25] Schaschke C., Fletcher I., Glen N. Density and viscosity measurement of diesel fuels at combined high pressure and elevated temperature. *Processes*, 2013, vol. 1, no. 2, pp. 30–48, doi: <https://doi.org/10.3390/pr1020030>
- [26] Cole R.H. *Underwater explosions*. Princeton Univ. Press, 1948. 496 p.

- [27] Zhao J., Grekhov L., Onishchenko D. et al. Methods for calculating fuel heating in electrically controlled injectors of Common Rail diesel systems. *Fuel*, 2021, vol. 305, art. 121526, doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.121526>
- [28] Grekhov L.V., Ivashchenko N.A., Markov V.A. *Toplivnaya apparatura i sistemy upravleniya dizeley* [Fuel injection equipment and control systems for diesel]. Moscow, Legion-Avtodata Publ., 2005. 344 p. (In Russ.).
- [29] Zhao J., Lu X., Grekhov L. Experimental study on the fuel heating at the nozzle of the high pressure common-rail injector. *Fuel*, 2021, vol. 283, art. 119281, doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.119281>
- [30] Daridon J.L., Lagrabette A., Lagourette B. Speed of sound, density, and compressibilities of heavy synthetic cuts from ultrasonic measurements under pressure. *J. Chem. Phys.*, 1998, vol. 30, no. 5, pp. 607–623, doi: <https://doi.org/10.1006/jcht.1997.0330>
- [31] Dzida M., Prusakiewicz P. The effect of temperature and pressure on the physicochemical properties of petroleum diesel oil and biodiesel. *Fuel*, 2008, vol. 87, no. 10–11, pp. 1941–1948, doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2007.10.010>
- [32] Giuliano Albo P.A., Lago S. Experimental speed-of-sound measurements of pure fatty acids methyl ester, mineral diesel and blends in a wide range of temperature and for pressures up to 300MPa. *Fuel*, 2014, vol. 115, pp. 740–748, doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.07.103>
- [33] Kadiata E.Ch., Slavutskiy V.M., Kurapin A.V. et al. Compressibility of palm oil and its mixtures with diesel fuel. *iPolytech Journal*, 2018, vol. 22, no. 10, pp. 178–188, doi: <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2018-10-178-188> (in Russ.).
- [34] Torres-Jimenez E., Dorado M.P., Kegl B. Experimental investigation on injection characteristics of bioethanol–diesel fuel and bioethanol–biodiesel blends. *Fuel*, 2011, vol. 90, no. 5, pp. 1968–1979, doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2010.11.042>
- [35] Alptekin E., Canakci M. Determination of the density and the viscosities of biodiesel–diesel fuel blends. *Renew. Energy*, 2008, vol. 33, no. 12, pp. 2623–2630, doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2008.02.020>
- [36] Dzida M., Žak A., Ernst S. Thermodynamic and acoustic properties of binary mixtures of alcohols and alkanes. I. Speed of sound in (ethanol+n-heptane) under elevated pressures. *J. Chem. Thermodyn.*, 2005, vol. 37, no. 5, pp. 405–414, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jct.2004.10.001>
- [37] Dávila M.J., Gedanitz H., Span R. Speed of sound measurements of liquid C1–C4 alkanols. *J. Chem. Thermodyn.*, 2016, vol. 93, pp. 157–163, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jct.2015.10.006>
- [38] Dashti H.H., Riazi M.R. Acoustic velocities in petroleum fluids: measurement and prediction. *J. Pet. Sci. Eng.*, 2014, vol. 124, pp. 94–104, doi: <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2014.10.013>
- [39] Habrioux M., Nasri D., Daridon L. Measurement of speed of sound, density compressibility and viscosity in liquid methyl laurate and ethyl laurate up to 200 MPa by using acoustic wave sensors. *J. Chem. Thermodyn.*, 2018, vol. 120, pp. 1–12, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jct.2017.12.020>
- [40] Tay W.J., Trusler J.P.M. Density, sound speed and derived thermophysical properties of n-nonane at temperatures between (283.15 and 473.15) K and at pressures up to 390 MPa. *J. Chem. Thermodyn.*, 2018, vol. 124, pp. 107–122, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jct.2018.04.019>
- [41] Dhakal S., Tay W.J., Al Ghafri S.Z.S. et al. Thermodynamic properties of liquid toluene from speed-of-sound measurements at temperatures from 283.15 K to 473.15 K and at pressures up to 390 MPa. *Int. J. Thermophys.*, 2021, vol. 42, no. 12, art. 69, doi: <https://doi.org/10.1007/s10765-021-02917-7>
- [42] Catania A.E., Ferrari A., Spessa E. Temperature variations in the simulation of high pressure injection-system transient flows under cavitation. *Int. J. Heat Mass Transf.*, 2008, vol. 51, no. 7–8, pp. 2090–2107, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2007.11.032>
- [43] Ndiaye E.H.I., Bazile J.-P., Nasri D. et al. High pressure thermophysical characterization of fuel used for testing and calibrating diesel injection systems. *Fuel*, 2012, vol. 98, pp. 288–294, doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2012.04.005>
- [44] Lowe A.R., Jasiok B., Melent'ev V.V. et al. High-temperature and high-pressure thermophysical property measurements and thermodynamic modelling of an international oil standard: RAVENOL diesel rail injector calibration fluid. *Fuel Process. Technol.*, 2020, vol. 199, art. 106220, doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2019.106220>

- [45] Freitas S.V.D., Santos Â., Moita M.-L.C.J. et al. Measurement and prediction of speeds of sound of fatty acid ethyl esters and ethylic biodiesels. *Fuel*, 2013, vol. 108, pp. 840–845, doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.02.041>
- [46] Lin C.W., Trusler J.P.M. The speed of sound and derived thermodynamic properties of pure water at temperatures between (253 and 473) K and at pressures up to 400 MPa. *J. Chem. Phys.*, 2012, vol. 136, no. 9, art. 094511, doi: <https://doi.org/10.1063/1.3688054>
- [47] Shchamialiou A.P., Samuilov V.S., Mosbakh F.M. et al. Densities, speed of sound, and derived thermodynamic properties of toluene, tetradecane, and 1-chlorohexane in the compressed liquid region. *Fluid Phase Equilib.*, 2020, vol. 507, art. 112427, doi: <https://doi.org/10.1016/j.fluid.2019.112427>
- [48] Peleties F., Segovia J.J., Trusler J.P.M. et al. Thermodynamic properties and equation of state of liquid di-isodecyl phthalate at temperature between (273 and 423) K and at pressures up to 140MPa. *J. Chem. Thermodyn.*, 2010, vol. 42, no. 5, pp. 631–639, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jct.2009.12.002>

Статья поступила в редакцию 13.04.2022

## Информация об авторах

**ГРЕХОВ Леонид Вадимович** — доктор технических наук, профессор кафедры «Комбинированные двигатели и альтернативные энергоустановки». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, к. 1, e-mail: [lgrekhov@mail.ru](mailto:lgrekhov@mail.ru)).

**МАРКОВ Владимир Анатольевич** — доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой «Комбинированные двигатели и альтернативные энергоустановки». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, к. 1, e-mail: [vladimir.markov58@yandex.ru](mailto:vladimir.markov58@yandex.ru)).

**АРСЕНОВ Никита Александрович** — магистрант кафедры «Комбинированные двигатели и альтернативные энергоустановки». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, к. 1, e-mail: [narsenov23@gmail.com](mailto:narsenov23@gmail.com)).

**ЧЖАО Цзяньхуэй** — профессор Колледжа энергетики и энергетического машиностроения. Харбинский инженерный университет (150001, Харбин, Китайская Народная Республика, улица Наньгун, 145, e-mail: [zhaojianhui@hrbeu.edu.cn](mailto:zhaojianhui@hrbeu.edu.cn)).

## Information about the authors

**GREKHOV Leonid Vadimovich** — Doctor of Science (Eng.), Professor, Department of Combined Engines and Alternative Power Plants. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2<sup>nd</sup> Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: [lgrekhov@mail.ru](mailto:lgrekhov@mail.ru)).

**MARKOV Vladimir Anatolyevich** — Doctor of Science (Eng.), Professor, Head of the Department of Combined Engines and Alternative Power Plants. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2<sup>nd</sup> Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: [vladimir.markov58@yandex.ru](mailto:vladimir.markov58@yandex.ru)).

**ARSENOV Nikita Aleksandrovich** — Master's Degree Student, Department of Combined Engines And Alternative Power Plants. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2<sup>nd</sup> Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: [narsenov23@gmail.com](mailto:narsenov23@gmail.com)).

**ZHAO Jianhui** — Professor, College of Energy and Power Engineering, Harbin University of Engineering (150001, Harbin, People's Republic of China, Nantong St., Bldg. 145, e-mail: [zhaojianhui@hrbeu.edu.cn](mailto:zhaojianhui@hrbeu.edu.cn)).

### Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Грехов Л.В., Марков В.А., Арсенов Н.А., Чжао Ц. Расчет и корректировка упругих свойств моторных топлив и других жидкостей. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2022, № 7, с. 49–67, doi: [10.18698/0536-1044-2022-7-49-67](https://doi.org/10.18698/0536-1044-2022-7-49-67)

### Please cite this article in English as:

Grekhov L.V., Markov V.A., Arsenov N.A., Zhao J. Analysis and Correction of Individual Property Values of Motor Fuels and Other Liquids. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2022, no. 7, pp. 49–67, doi: [10.18698/0536-1044-2022-7-49-67](https://doi.org/10.18698/0536-1044-2022-7-49-67)