

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОНСТАНТ УРАВНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ ДЛЯ РАСЧЕТА УПРУГИХ СВОЙСТВ РАЗЛИЧНЫХ МОТОРНЫХ ТОПЛИВ И ТЕХНИЧЕСКИХ ЖИДКОСТЕЙ

Л.В. Грехов<sup>1</sup>

grekhov@bmstu.ru

В.А. Марков<sup>1</sup>

markov58@bmstu.ru

Н.А. Арсенов<sup>1</sup>

nicitaarsenov@yandex.ru

Ц. Чжао<sup>2</sup>

zhaojianhui@hrbeu.edu.cn

Б. Са<sup>1</sup>

bowensa@yandex.ru

<sup>1</sup> МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

<sup>2</sup> Харбинский инженерный университет, Харбин, Китай

---

### Аннотация

Создание современных математических моделей нестационарного высоконапорного впрыскивания топлива в двигателях требует замены универсальных эмпирических уравнений для одного из упругих свойств топлива на математически более корректное уравнение состояния. Обоснована необходимость существования и использования удобных и простых форм уравнения состояния, позволяющих быстро и с достаточной точностью определять значения плотности, коэффициента сжимаемости и скорости звука традиционных и альтернативных топлив для дизельных двигателей. Проанализированы современные подходы к описанию состояния капельных и двухфазных жидкостей. Отсутствие фазовых переходов в процессе подачи топлива под высокими давлениями позволило обосновать возможность использования уравнения состояния для прямого и обратного счета. Предложено уравнение состояния, адекватное процессам с высокими и ультравысокими (до 400 МПа) давлениями и умеренно высокими (до 460 К) температурами. Описаны применяемое оборудование и способ получения эмпирической информации через определение текущей скорости звука. Приведены метод расчета значений констант выбранной формы уравнения состояния в виде выражений, определяющих их зависимость от температуры, и алгоритм расчета констант уравнения состояния при обработке экс-

### Ключевые слова

*Топливоподающая аппаратура, уравнение состояния, топливо, альтернативные топлива, ультравысокие давления, константы уравнения состояния, упругие свойства топлив*

периментальных данных. На основе данных из литературы, а также результатов проведенных исследований получены комплекты эмпирических коэффициентов уравнения состояния для 49 дизельных топлив, различных испытательных и технических жидкостей, альтернативных моторных топлив

Поступила 03.06.2022

Принята 01.07.2022

© Автор(ы), 2022

---

*Исследование выполнено за счет гранта РФФИ (проект № 21-49-00012)*

**Введение.** В настоящее время перед промышленностью стоят сложные задачи по разработке дизельных двигателей нового поколения, удовлетворяющих жестким текущим и перспективным нормам эмиссии вредных веществ, а также предъявляемым требованиям к расходу топлива. Такой способ, как интенсификация впрыскивания топлива является наиболее эффективным средством по минимизации этих показателей двигателей [1]. Экспериментальные исследования подтверждают возможность снижения уровня вредных выбросов при повышении давления впрыскивания, например, до 300...320 МПа [2, 3] и более (до 350...400 МПа) [4, 5]. Так, в серийной продукции можно встретить топливные системы, обеспечивающие давление впрыскивания 250...270 МПа.

Для расчета подобных топливных систем отпадает возможность использования старых экспериментальных данных, полученных для давлений менее 60...80 МПа. Кроме того, современные математические модели, призванные описывать процесс топливоподачи в дизельных двигателях, отличаются от традиционных. Отличия заключаются в более точном описании топливоподачи как чистых топлив, так и многокомпонентных смесей. Данные модели могут учитывать непостоянство скорости звука в жидкости, а также позволяют использовать уравнения массового расхода вместо уравнений объемного расхода в выражениях граничных условий. Дополнительно требуется описание тепловых эффектов при подаче топлива с высокими давлениями. Таким образом, возникает необходимость перехода от традиционных эмпирических соотношений для плотности, скорости звука, коэффициента сжимаемости (модуля упругости) к более универсальным соотношениям, а именно к уравнениям состояния для рабочей жидкости в явном виде. Эта задача не является новой, и предложения по учету уравнения состояния в исходной системе уравнений были предприняты прежде, но многие из них оказались сложны для применения в условиях маршевого счета. Для других уравнений возможность их применения для описания параметров жидкостей при высоких уровнях давления не была доказана [6].

Для расчета топливоподачи применяются модели, в которых фигурируют такие физические свойства жидкостей, как плотность, сжимаемость, вязкость. Размерность используемых математических моделей в основном ограничивается 1D и нульмерными моделями [7, 8].

Выполнено множество работ, посвященных прогнозированию свойств топлив в зависимости от их состава. Например, в работе [9] предложено прогнозирование вязкости для широкого перечня нефтяных дизельных топлив. Прогнозирование выполняли путем определения влияния на вязкость молярных долей различных компонентов дизельного топлива с помощью многомерной газовой хроматографии при давлениях до 300 МПа и более. Однако известно, что используемые для двигателей типы дизельного топлива различаются по своему составу и свойствам. Различия обоснованы местом происхождения и типом обработки сырья, поэтому неясно, как обобщить полученные результаты на конкретные партии топлива.

Упругие свойства моторных топлив и их зависимости от параметров состояния являются наиболее важными для математического описания нестационарного процесса впрыскивания с высокими давлениями. Для описания упругих свойств необходимо знание зависимостей, предлагаемых выбранной формой уравнения состояния. В общем виде уравнение состояния можно представить как

$$\rho = f(p, T). \quad (1)$$

Давно используются уравнения состояния для реальных газов, наиболее известное среди них — это уравнение Ван-дер-Ваальса [10], а также ряд его модификаций. В общем виде их можно записать так [11]:

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

где  $k_1 = 0$ ,  $k_2 = 1$ ,  $a = 0,4275 R^2 T_c^2 / p_c$ ,  $b = 0,0866 RT_c / p_c$ .

Например, популярно уравнение Редлиха — Квонга [12], выведенное из уравнений состояния, учитывающих парные взаимодействия компонентов смесей для различных жидкостей,

$$p = \frac{RT}{V - b} - \frac{a(T)}{V(V + b)}. \quad (3)$$

В качестве попытки совершенствования модели (2), позволяющей моделировать низкотемпературные свойства дизельного топлива, известны работы [13, 14]. Аналогично, в уравнении (2):  $k_1 = 1$ ,  $k_2 = 1$ ,  $a = 0,4572 R^2 T_c^2 / p_c$ ,  $b = 0,0778 RT_c / p_c$ .

Исходное уравнение Ван-дер-Ваальса справедливо в (2) при параметрах:  $k_1 = 0$ ,  $k_2 = 0$ ,  $a = 3 p_c / V_c^2$ ,  $b = 0,0778 V_c / 3$ . В уравнениях коэффициент  $b$  учитывает объем молекул и пространство между ними, функция  $a(T)$  — силы взаимодействия между молекулами, а далее при детализации — парные взаимодействия компонентов рассматриваемой смеси. Ввиду сложности теоретического расчета эта поправка подбирается на основе экспериментальных данных.

При расчете топливоподачи на уровне давления до 400 МПа топливо представляет собой однофазную капельную жидкость. Только в частных случаях возможно газообразование при кратковременном падении давления ниже давления насыщенных паров. Однако приведенные уравнения состояния могут использоваться для описания смесей со значительным начальным содержанием газовой фазы и с учетом соответствующей теплоты парообразования. Уравнения (2), (3) позволяют лишь качественно отразить поведение жидкостей при высоких уровнях давления, при этом учет взаимодействия компонентов смеси в них трудоемок. Поэтому следует считать более обоснованным применение уравнений состояния однокомпонентных жидкостей, имеющих большую точность. Такие уравнения есть, например в [15]. Однако сложность получаемых выражений велика, что делает их малоприменимыми для практических расчетов, особенно жидких топлив в нестационарном процессе с ультравысокими давлениями.

Отметим также уравнения состояния, основанные на статистической теории ассоциативной жидкости как возмущенных цепей (Perturbed chain statistical associating fluid theory, PC-SAFT). В подобных уравнениях используются статистические методы, в частности теория возмущений. При моделировании характеристик жидкостей с помощью уравнений PC-SAFT эталонная жидкость представляется ансамблем (совокупностью) сферических частиц, поверхности которых связаны друг с другом и взаимодействуют через межмолекулярный потенциал. Уравнения подобного типа формулируются в терминах остаточной безразмерной энергии Гельмгольца. Применение уравнений PC-SAFT оправдано с точки зрения точности описания условий равновесия на границах фаз рассматриваемой жидкости. Этой теме посвящен ряд исследовательских работ, авторы которых предлагают собственные модификации уравнения состояния PC-SAFT [16], в том числе с использованием искусственных нейронных сетей [17].

В реальной системе топливоподачи в случае наличия газов в топливе обычно их содержание исчисляется долями или единицами процентов.

Поэтому поиск адекватного описания поведения параметров капельных жидкостей в однофазном состоянии представляется актуальной задачей. Дисперсионные модели дают хорошие результаты по расчету параметров жидкого топлива при наличии в нем небольшого содержания газов, при этом имеющийся объем газа в них подчиняется известным газовым законам.

Попытки поиска и описания уравнения состояния жидкостей предпринимаются постоянно. Например, базируясь на концепции суммы взаимодействий двух различных молекул, предлагают уравнение в форме Лепендина [18].

Среди уравнений, позволяющих описать поведение капельных жидкостей, наиболее физически обоснованным является уравнение Тейта. Оно используется для зависимости плотности жидкости от давления и опубликовано в 1888 г. Первоначально уравнение было записано для осредненного коэффициента сжимаемости воды, стекла и ртути в целях определения температуры в морских глубинах. Позже проводилось описание состояния сжатого азота и аммиака [19]. Собственно уравнение можно привести в форме

$$\frac{V_0 - V}{(p - p_0)V_0} = -\frac{1}{V_0} \frac{\Delta V}{\Delta P} = \frac{A}{\Pi + (p - p_0)}; \quad (4)$$

здесь  $p_0$  — давление при нормальных условиях;  $V_0$  — объем пресной воды при нормальном давлении;  $A$  и  $\Pi$  — параметры, определяемые экспериментально.

Сегодня уравнение Тейта часто записывается в следующем виде [19]:

$$\frac{\rho - \rho_0}{\rho_0} = C \ln \left( \frac{B + p}{B + p_0} \right); \quad (5)$$

здесь константы  $C$  и  $B$  представляются как функции температуры, поэтому выражение (5) и носит название уравнения состояния.

Выражение уравнения состояния в форме уравнения Тейта для определения коэффициента сжимаемости пяти различных нефтяных дизельных топлив при давлении до 500 МПа и температуре нагрева до 373 К предложено в [11]. Коэффициент сжимаемости приведен как функция температуры и давления в виде

$$Z = \frac{pv_0}{RT} \left( 1 - C \lg \left( \frac{B + p}{B + 0,1} \right) \right), \quad (6)$$

где

$$v_0 = \frac{M}{1000} (k_0 + k_1T + k_2T^2)^{-1} \quad (7)$$

— функция температуры ( $M$  — константа);  $C$  и  $B$  — коэффициенты из уравнения Тейта в выражении (5) ( $C$  — константа для соответствующей жидкости);

$$B = b_0 + b_1T + b_2T^2 \quad (8)$$

— функция температуры.

Авторы исследования [20] предлагают еще одну форму уравнения состояния, схожую с уравнением Тейта, предназначенную для расчета плотности дизельных топлив при давлениях до 300 МПа и температуре до 530 К. Отметим, что данные по плотности смоделированы с помощью уравнения состояния статистической ассоциативной теории жидкости с возмущенной цепью (PC-SAFT) и обобщены в форме уравнения Тейта:

$$\frac{\rho - \rho_0(T)}{\rho} = C \lg \left( \frac{p + B(T)}{p_0 + B(T)} \right), \quad (9)$$

где

$$\rho_0(T) = \sum_{i=0}^2 a_i T^i; \quad (10)$$

$$B(T) = \sum_{i=0}^2 b_i T^i. \quad (11)$$

Уравнение Тейта и его модификации применяются для описания поведения жидкостей при высоких уровнях давления. Понятно, что константы данных уравнений определяются на основе экспериментальных данных, тем не менее при работе с выражениями на основе уравнений (5), (6), (9) нельзя сказать, что константы  $C$  и  $B$  являются универсальными.

В настоящее время популярным подходом, с точки зрения описания уравнения состояния является установление формальных связей между основными параметрами. Связи могут быть представлены в виде полиномов или более сложных функций [21]. Например, по интересующей нас теме можно привести полученные соотношения для плотности, скорости звука и других важных свойств в виде

$$\rho = \sum_{i=1}^3 \left( \sum_{j=1}^3 a_{ij} T^{j-1} \right) p^{i-1}, \quad (12)$$

где

$$a = \begin{pmatrix} 828,59744 & 0,63993 & -0,00216 \\ 8,65679e - 07 & -5,93672e - 09 & 1,56678e - 11 \\ -7,59052e - 16 & 8/99915e - 18 & -2,7789e - 20 \end{pmatrix}.$$

Подобные формы расчета и представления результатов популярны при расчете процесса топливоподачи с использованием альтернативных топлив [22, 23]. Однако уравнения (6) остаются неуниверсальными. Работа с ними неудобна с точки зрения обратных пересчетов.

Таким образом, ни один из предложенных способов описания связи между параметрами состояния жидких топлив полностью не удовлетворяет требованиям, предъявляемым к модели топливоподачи в дизельных двигателях: учет переменного характера скорости звука, коэффициента сжимаемости и плотности, простая аналитическая связь, удобная форма прямых и обратных пересчетов, адекватность и достаточная точность получаемых результатов, возможность простой оценки свойств жидких и газожидкостных смесей.

Обратим внимание на еще одно уравнение, схожее с уравнением Тейта, предложенное для воды в [24]:

$$\frac{B + p}{\rho^{\aleph}} = \frac{B}{\rho_0^{\aleph}} = \text{const}, \quad (13)$$

где константы  $B$  и  $\aleph$  определяются в соответствии с экспериментальными данными. Так, для морской воды данные константы оценивались как  $B = 298,7$  МПа;  $\aleph = 7,15$ .

В работах [25–27] предложена более удобная и общая форма уравнения (13) в следующем виде:

$$\left( \frac{\rho}{\rho_{0t}} \right)^{\aleph} = \frac{B + p}{B + p_0}. \quad (14)$$

С помощью уравнения (14) далее будут обобщаться экспериментальные данные.

**Экспериментальное оборудование и источники экспериментальных данных.** Для определения упругих свойств рассматриваемых жидкостей использован метод регистрации времени движения волны давления в прямом и обратном направлениях по длинной термостатированной трубе [28, 29]. Основная экспериментальная установка — промышленный топливный стенд 12 PSB с системой управления «Поток CR-1» (рис. 1).



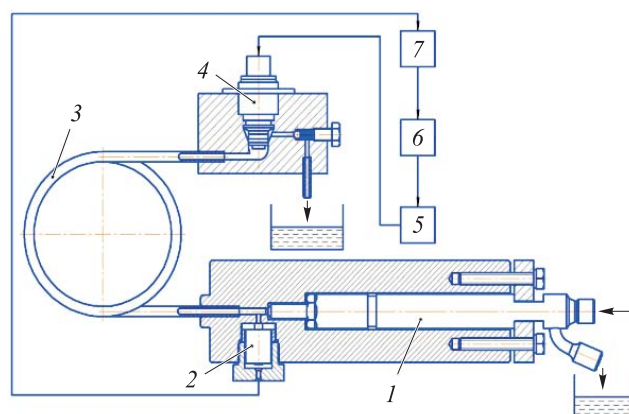
**Рис. 1.** Топливный испытательный стенд для измерения скорости звука

Указанный метод изначально предложен для определения характеристики впрыскивания, поэтому здесь он применяется для задачи по определению скорости звука в рассматриваемых моторных топливах и других жидкостях. В данном случае измерительная трубка свернута в спираль и расположена в горизонтальной плоскости для более удобного и быстрого удаления возникающих газов. Для создания требуемой температуры топлива при работе установки адаптер, измерительная труба и ресивер обматывались специальными электрическими силиконовыми керамическими нагревателями. Такое решение позволяло точно поддерживать выбранную температуру топлива. При этом система прогревалась достаточно быстро и управлялась с помощью обратной связи по датчику температуры. После совершения рабочего цикла топливо охлаждалось за счет собственной системы термостабилизации топливного стенда. Схема измерителя приведена на рис. 2.

Цифровой датчик, фиксирующий температуру топлива, установлен в адаптер рядом с датчиком давления. Хромель-алюмелевые датчики после калибровки по разным оценкам имеют погрешность измерения до 1,5 %, а диапазон их измерений лежит в пределах 0...200 °С.

Чувствительность пьезоэлектрических датчиков QC42D-E фирмы AVL List GmbH (Австрия) оценивается значением порядка 67,12 (пКл/МПа). Выходное напряжение усилителя лежит в диапазоне 0...5 В, чувствительность составляет 100...0,01 (пВ/пКл), коэффициент усиления — до 100 000, отклонения напряжения не превышают  $\pm 1$  мВ. Для всех датчиков и усилителя верхний предел собственной частоты равен 200 кГц (не менее). Точность измерений  $\pm 1,5$  %.





**Рис. 2.** Схема измерителя скорости звука:

1 — форсунка; 2 — датчик давления; 3 — измерительная труба;  
4 — электромагнитный клапан управления; 5 — блок широтно-импульсной модуляции;  
6 — блок управления; 7 — усилитель

Для тензометрических датчиков MD-150V диапазон рабочих значений температуры определяется от  $-50$  до  $125$  °С. Нелинейность датчиков составляет  $\pm 0,2\%$ , а предельное давление равно 20 МПа.

Получить экспериментальные данные по скорости звука с помощью описанной установки по широкой номенклатуре традиционных и альтернативных топлив оказалось невозможно. Поэтому принято решение использовать дополнительные источники, включающие в себя экспериментальные значения скорости звука.

Научные статьи выбирались с учетом наличия таблиц с первичными экспериментальными данными [30–52]. Для реализации методики по определению констант уравнения состояния (7) требуется наличие экспериментальных данных, приведенных для диапазона давлений.

**Метод поиска констант уравнения состояния.** Выражение (14) ввиду приведенных причин признано оптимальной формой уравнения состояния для жидких моторных топлив в условиях нестационарного неизотермического процесса с высокими и ультравысокими давлениями впрыскивания топлива. Выражение (14) оправдывает свое использование с точки зрения точности получаемых результатов, отличается большей универсальностью, но не является следствием аналитического вывода. Оно представляет собой удачную форму связи параметров состояния жидкости и носит эвристический характер.

Указанные константы зависят от температуры ( $B = f(T)$ ;  $\aleph = f(T)$ ), что позволяет формально называть выражение (14) уравнением состояния. В выполненных работах значения констант определялись в виде [25]:

$$B = 10^6 [B_0 + B_1(t - 20) + B_2(t - 20)^2 + B_{r0}(\rho_{20} - 825)]; \quad (15)$$

$$\varkappa = \varkappa_0 + \varkappa_1(t - 20) + \varkappa_2(t - 20)^2.$$

Универсальная форма (14) позволяет получать все необходимые значения по актуальным упругим свойствам топлив, используемых в математических моделях нестационарного процесса впрыскивания [25]:

$$\alpha = \sqrt{\left(\frac{dp}{d\rho}\right)} = \sqrt{\frac{\varkappa}{\rho_0} B^{\frac{1}{\varkappa}} (p + B)^{\frac{\varkappa-1}{\varkappa}}}; \quad (16)$$

$$\beta = \frac{1}{E_V} = \frac{1}{\varkappa(p + B)}; \quad (17)$$

$$\rho = \rho_0 \left(\frac{B+P}{B}\right)^{\frac{1}{\varkappa}}; \quad (18)$$

здесь  $\rho_0$  — плотность рассматриваемой жидкости при актуальных температуре и атмосферном давлении.

Формулы (16)–(18) будут использоваться в настоящей работе для получения расчетных значений указанных свойств жидкостей при различных значениях параметров состояния, обработке экспериментальных данных и в программах получения констант уравнения состояния для расширения сведений о различных моторных топливах и иных технических жидкостях.

В целях повышения универсальности эмпирических аппроксимаций для констант топлив родственных семейств, например нефтяного происхождения, дополнительно вводится зависимость от плотности как меры осредненной молекулярной массы смеси. Так, в (15) приведены подобные аппроксимации констант для дизельного топлива [51, 52] (плотность  $\rho_{20}$  взята при атмосферном давлении и температуре 20 °С).

В настоящей работе используются аппроксимации значений  $B$  по температуре в виде полиномов более высоких степеней, хотя обычно целесообразно ограничиваться третьей степенью:

$$B = B_0 + B_1(t - 20) + B_2(t - 20)^2 + \dots + B_n(t - 20)^n; \quad (19)$$

$$\varkappa = \varkappa_0 + \varkappa_1(t - 20) + \varkappa_2(t - 20)^2 + \dots + \varkappa_n(t - 20)^n. \quad (20)$$

Предлагаемый способ определения значений констант уравнения состояния в форме (14) основан на корреляции получаемых расчетных значений упругих свойств жидкостей (плотности, коэффициента сжимаемости) с экспериментальными данными, полученными при работе на имеющемся исследовательском оборудовании, а также приведенными в [30–52].

Близость расчетных и экспериментальных данных обеспечена адекватным подбором значений констант уравнения состояния, выполненным для каждой конкретной температуры жидкости, в заранее назначенном диапазоне изменения давлений. Для подбора значений констант, обеспечивающих сходимость расчетных и экспериментальных данных в выбранном диапазоне давлений, разработана программа обработки данных. Работа алгоритма и программы обеспечивается в несколько этапов.

1. Сканирование по значениям констант  $\aleph$  в заранее выбранном диапазоне образует внутренний цикл.

2. Сканирование по значениям констант  $B$  в заранее выбранном диапазоне образует внешний цикл.

3. Расчет конкретного значения исследуемой величины (плотности, коэффициента сжимаемости) для текущего давления из заданного диапазона при каждом сочетании констант  $B$  и  $\aleph$  — определение ошибки между полученным расчетным значением и экспериментальным.

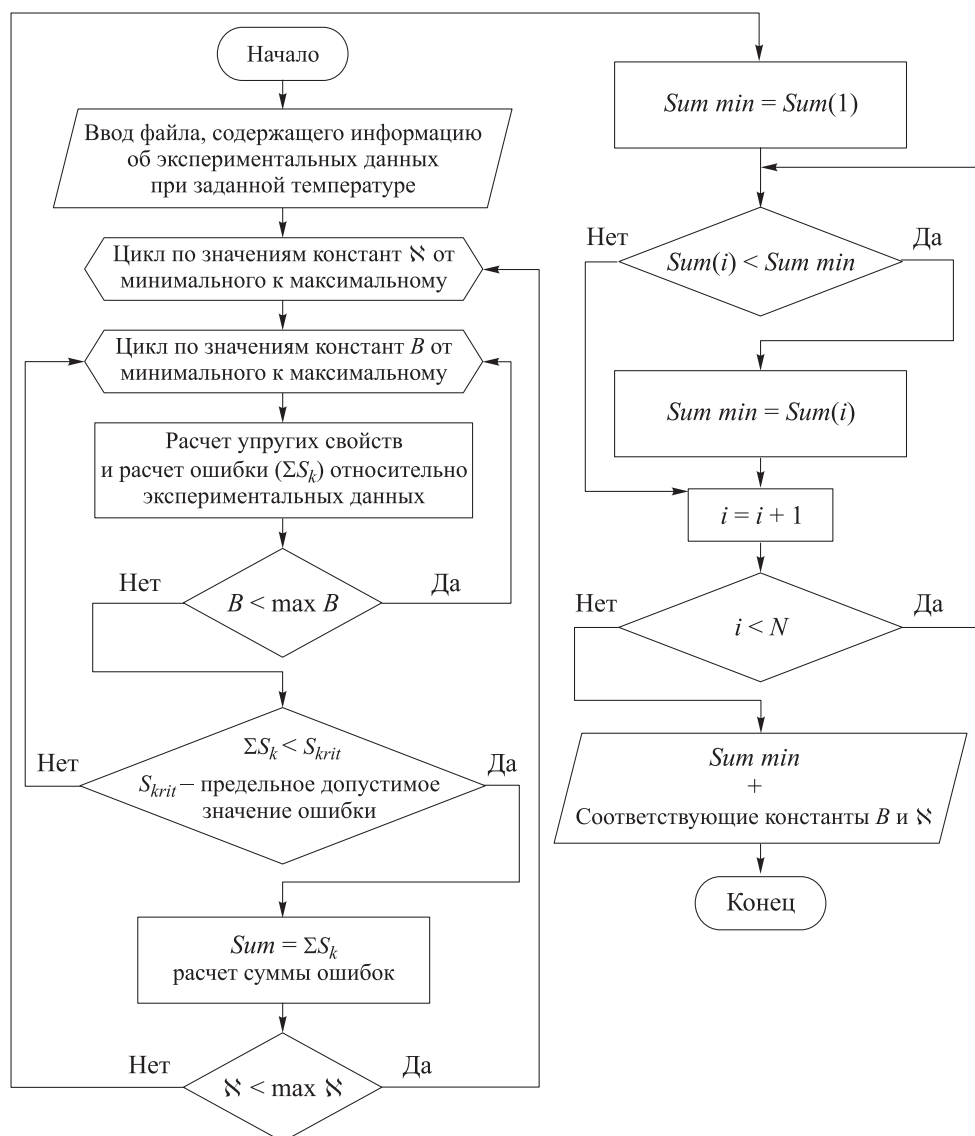
4. Суммирование значений полученных ошибок по всему диапазону давлений при текущем сочетании констант. Критерием выбора оптимального соотношения значений констант  $B$  и  $\aleph$  является минимальная сумма ошибок.

Отметим, что температура топлива в данных, используемых в одной итерации программы, принимается постоянной. Поэтому для получения аппроксимаций для констант от температуры типа (19), (20) необходим последовательный ввод в программу файлов с данными при разных температурах. Таким образом, возможен поиск значений констант для любого диапазона температур.

Подробная блок-схема, описывающая работу программы, приведена на рис. 3.

После получения сочетаний констант из программы для каждой рассматриваемой температуры исследуемой жидкости выполняется построение графических зависимостей отдельно для каждой константы по диапазону значений температуры. Например, на рис. 4 предлагается зависимость констант  $B$  и  $\aleph$  в диапазоне рассматриваемых значений температуры для п-нонана [41], а также их аппроксимации. Для поиска аппроксимаций констант используется стандартный набор инструментов программы Microsoft Excel.

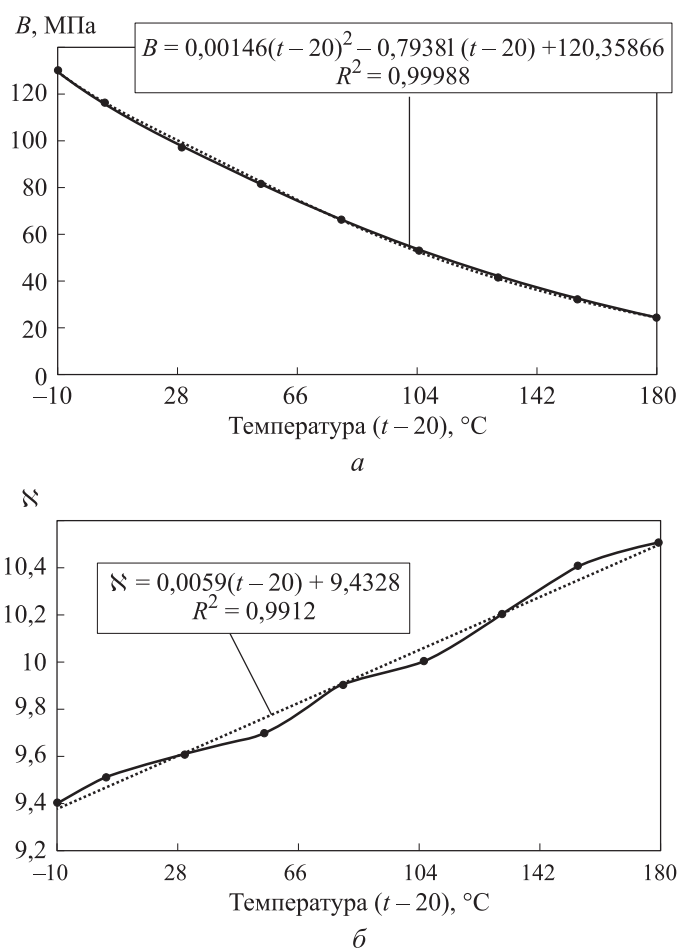
Приведенная процедура получения зависимостей от температуры для констант уравнения состояния универсальна с точки зрения прямых и обратных пересчетов по экспериментальным данным, содержащим значения различных упругих свойств. Она позволила получить необходимые



**Рис. 3.** Блок-схема программы поиска оптимального сочетания значений констант уравнения состояния  $B$  и  $N$  :

$i$  — общее число ошибок, соответствующее комбинации констант;  $N$  — число комбинаций констант и соответствующих им суммарных ошибок

для расчета упругих свойств жидкостей значения констант для широкого перечня традиционных и альтернативных топлив и иных технических жидкостей. Для реализации методики поиска констант уравнения состояния исходные экспериментальные данные относят к диапазону давлений. В первую очередь обращалось внимание на данные с высокими и ультравысокими давлениями.

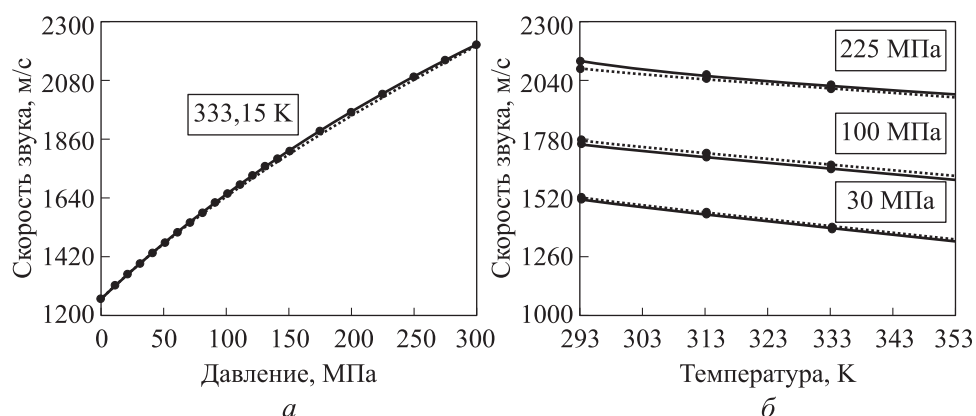


**Рис. 4.** Зависимость констант  $B$  (а) и  $N$  (б) уравнения состояния, полученных по программе, от температуры для п-нонана [41]:

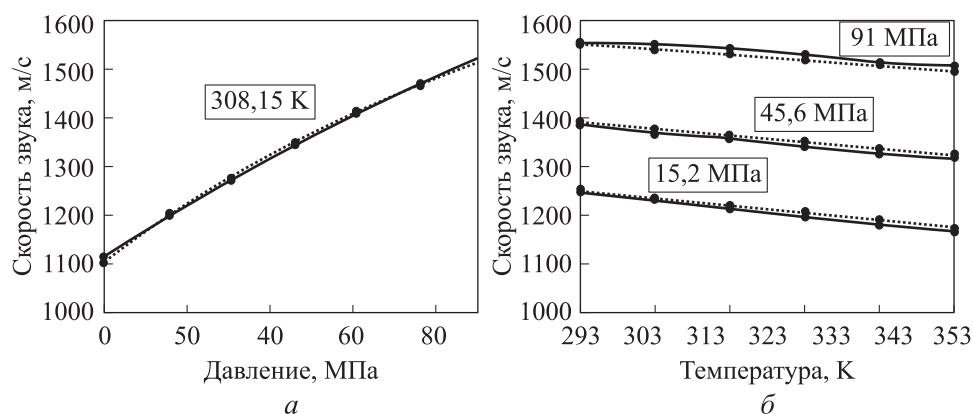
— эксперимент; ..... — аппроксимации вида (19) и (20)

По предлагаемой методике обработаны имеющиеся данные собственных экспериментов (для дизельных топлив и ряда альтернативных), а также экспериментальные данные, приведенные в [30–52]. Рекомендации по выбору значений констант для расчета свойств различных жидкостей приведены далее.

**Результаты и их анализ.** Дальнейшая процедура определения констант уравнения состояния  $B$  и  $N$  заключалась в нахождении значений упругих свойств жидкостей с помощью выражений (16)–(18) и сравнения с исходными экспериментальными данными. Так, на рис. 5 приведено сравнение полученных расчетных скоростей звука для дизельного топлива с экспериментальными данными [32]. Аналогичные зависимости приведены на рис. 6 для этанола [36].



**Рис. 5.** Сравнение результатов расчета и экспериментальных данных по скорости звука для дизельного топлива в зависимости от давления при температуре 333 К (а) и от температуры (б) при давлении 30, 100 и 225 МПа (— — расчет; ..... — эксперимент)



**Рис. 6.** Сравнение результатов расчета и экспериментальных данных по скорости звука для этанола в зависимости от давления при температуре 308 К (а) и от температуры (б) при давлении 15,2, 45,6 и 91 МПа (— — расчет; ..... — эксперимент)

Сравнение полученных результатов расчета с экспериментальными данными приведено на рис. 5, 6 только для двух жидкостей. В силу ограниченности материалов остальные не приведены, но характер поведения результатов сравнения аналогичен.

Расчетные зависимости для упругих свойств, в частности для скорости звука (16), обеспечивают достаточно хорошую сходимость с экспериментальными данными с учетом использования рекомендованного метода поиска констант уравнения состояния. Максимальное расхождение значений

расчетных скоростей звука с экспериментальными для дизельного топлива [32] составляет 2,7 %, для этанола [36] — 1 %.

Для уравнения состояния в форме (14) получены значения их коэффициентов  $B$  и  $\aleph$  в уравнениях (19), (20). Для этого обрабатывались собственные экспериментальные данные и источники экспериментальных данных [30–52]. При этом по описанной процедуре вычислялись и оценивались упругие свойства жидкостей по формулам (16)–(18), в каждом конкретном случае — свои, в зависимости от типа экспериментальных данных.

Для аппроксимирующих полиномов (19), (20) в таблице приведены константы для различных топлив и жидкостей. Эти результаты рекомендуются для использования в математических гидродинамических моделях течения топлив в элементах топливных систем, а также иных технических приложениях, характеризующихся движением жидкостей с изменяющимися параметрами состояния, в первую очередь с высокими давлениями.

Среди приведенных в таблице данных имеются рекомендации не только для традиционных и альтернативных топлив, но и для химических жидкостей, технической воды. Расчетные данные по скоростям звука с применением указанных рекомендаций по определению констант выбранного уравнения состояния показали хорошую сходимость с экспериментальными значениями. Это свидетельствует о применимости указанной методики расчета упругих свойств, основанной на уравнении состояния в форме (14) не только для области высоконапорной топливной аппаратуры, но и для других применений, где необходимо знание конкретных значений свойств жидкости при высоком давлении (плотности, скорости звука, коэффициента сжимаемости).

Отметим, что реализация метода по поиску констант для уравнения (14) позволяет значительно упростить процедуру получения данных об упругих свойствах разных жидкостей. Это обстоятельство способствует быстрому наращиванию базы данных и восполнению пробелов в результатах, вызванных неоднородностью экспериментальных данных при работе с конкретными видами топлив и жидкостей.

**Заключение.** Выбранная форма уравнения состояния (14) отвечает предъявляемым к ней требованиям: она проста, удобна с точки зрения прямых и обратных пересчетов, может быть использована в любых математических моделях, применяемых для описания быстропротекающего процесса топливоподачи в дизельной аппаратуре при высоких и ультравысоких давлениях. Выражение (14), а также построенные на его базе уравнения (16)–(18) хорошо описывают поведение упругих свойств топлив и других жидкостей.

Константы уравнения состояния  $V$  и  $N$

Тип жидкости	Тип данных	$T, K$	$V, MPa$				$N$			
			$B_0$	$B_1 \cdot 10^4$	$B_2 \cdot 10^4$	$B_3 \cdot 10^6$	$N_0$	$N_1 \cdot 10^3$	$N_2 \cdot 10^5$	$N_3 \cdot 10^7$
Дизельное топливо S250 [30]	Скорость звука	293–373	133,89	-6345	0	0	10,8	7,5	-2,92	0
		293–373	136,91	-6300	0	0	11,49	-5,1385	10,17	0
Дизельное топливо S300 [30]	Скорость звука	292–318	138,35	-7931	0	0	11,4	-10,08	166,67	-444,44
Дизельное топливо Shell (2014) [32]		273–353	148,44	-6027	-13,1	0	11	-10,75	18,7	0
Дизельное топливо (RU, 2018) [33]	Плотность	323	93,83	0	0	0	10,5	0	0	0
Дизельное топливо Shell Extra [34]		288	138,3	0	0	0	11,4	0	0	0
Дизельное топливо EN 590 [37]	Скорость звука	293	152,5	0	0	0	9,9	0	0	0
Дизельное топливо (2008) [34]		288	152,5	0	0	0	9,9	0	0	0
Дизельное топливо 2016 [35]	Плотность	263–465	182,72	-12 880	28	0	8,0033	9,4	0	0
		293–318	159,77	-8777	0	0	11,1	5,6429	7,1429	0
Биодизель на основе RME [31]	Скорость звука	293–353	171,72	-7167	-10,6	0	10,5	-5,5	12,5	0
Метиловый эфир рапсового масла (RME) [32]		293–353	171,72	-7167	-10,6	0	10,5	-5,5	12,5	0



Продолжение таблицы

Тип жидкости	Тип данных	Т, К	В, МПа			N				
			$B_0$	$B_1 \cdot 10^4$	$B_2 \cdot 10^4$	$B_3 \cdot 10^6$	$N_0$	$N_1 \cdot 10^3$	$N_2 \cdot 10^5$	$N_3 \cdot 10^7$
Метиловый эфир соевого масла (SME) [32]		293-353	164,91	-3473	-51,9	0	10,9	-50	150	-125
			101,12	-7650	48	0	10,6	37,8	-250,8	592,6
			85,45	-7217	21,857	0	10,7	21	-110	296,3
Биодизель по стандарту EN 14214 [37]		293	166,2	0	0	0	9,9	0	0	0
Биэтанол по стандарту ISO 9001 [37]		293	109,5	0	0	0	9,5	0	0	0
Пальмовое масло [33]		323	182,9	0	0	0	8,4	0	0	0
Этанол [38]	Скорость звука	253-353	92,58	-6046	0	0	11,75	12	0	0
Метанол [38]		253-353	92,36	-6212	0	0	11	13,71	0	0
Пропанол (by Sigma-Aldrich) [38]		253-353	102,58	-6463	0	0	13,1	13	0	0
Бутанол (by Sigma-Aldrich) [38]		253-35	108,05	-6598	0	0	12,08	12,3	0	0
п-октан [39]		298-383	94,44	-8129	30,7	0	10,78	20,6	-16,05	0
п-гексадекан [39]		298-383	256,9	-30 382	120	0	5,5	59	0	0
Метиллаурат [40]		293-353	141,6	-6025	0	0	11,3	-13,5	12,5	0
Этиллаурат [40]		293-353	140,4	-6015	0	0	11,2	-16,8	18,7	0
п-нонан [41]		283-473	120,4	-7938	14,6	0	9,4	5,9	0	0
Толуол [42]		283-473	179,9	-10 700	18,5	0	9,233	4,94	0	0

Жидкость калибровочная ISO 4113 [43]	313-373	144,8	-7305	0	0	10,1	17,5	-12,5	0
Жидкость калибровочная Norma-fluid [44]	283-423	142	-7504	3,7041	6,1143	11	1,029	7,9545	-4,419
Жидкость калибровочная RAVENOL [45]	300-371	140,3	-4687	-28,688	0	10,9	-13,2	32,16	0
Жидкость калибровочная Norma-fluid ISO 4113 [46]	293-373	137	-6340	0	0	11,9	2	0	0
Биотопливо из пальмового масла (WPOB) [34]	288	159,8	0	0	0	11,1	0	0	0
Биотопливо из подсолнечного масла (SFOB) [34]	288	171,9	0	0	0	10,5	0	0	0
Биотопливо из соевого масла (SOB) [34]	288	164,7	0	0	0	10,9	0	0	0
Биотопливо из кукурузного масла (CROB) [34]	288	171,9	0	0	0	10,5	0	0	0
Биотопливо из рапсового масла (COB) [34]	288	166,2	0	0	0	9,9	0	0	0
Биотопливо из хлопкового масла (CSOB) [34]	288	171,9	0	0	0	10,5	0	0	0
Биотопливо из соевого масла (EN 14214) [47]	293-343	159,8	-8777	0	0	11,1	5,6429	7,1429	0
	Скорость звука								
	Плотность								
	Скорость звука								

Тип жидкости	Тип данных	T, К	B, МПа				N			
			B <sub>0</sub>	B <sub>1</sub> · 10 <sup>4</sup>	B <sub>2</sub> · 10 <sup>4</sup>	B <sub>3</sub> · 10 <sup>6</sup>	N <sub>0</sub>	N <sub>1</sub> · 10 <sup>3</sup>	N <sub>2</sub> · 10 <sup>5</sup>	N <sub>3</sub> · 10 <sup>7</sup>
Биотопливо из подсолнечного масла (EN 14214) [47]	Скорость звука	293–343	159,8	-8777	0	0	11,1	5,6429	7,1429	0
		293–343	159,8	-8777	0	0	11,1	5,6429	7,1429	0
Биотопливо из пальмового масла (EN 14214) [47]	SV	293–343	159,8	-8777	0	0	11,1	5,6429	7,1429	0
		293–343	159,8	-8777	0	0	11,1	5,643	7,1429	0
Этилпальмитат [47]	Скорость звука	293–343	159,8	-8777	0	0	11,1	5,643	7,1429	0
Этилстеарат [47]		293–343	159,8	-8777	0	0	11,1	5,643	7,1429	0
Этилолеат [47]		293–343	159,8	-8777	0	0	11,1	5,643	7,1429	0
Этиллинолеат [47]		293–343	159,8	-8777	0	0	11,1	5,643	7,1429	0
Чистая вода [48]	Скорость звука	273–473	311,5	22 070	-296	80,13	7	-18,7	32,505	-9,8673
1-хлоргексан [49]		298–433	121,8	-10 300	37,625	0	11,1	-16,7	65,425	-4,0594
Диизодецилфталат [50]		298–413	166,4	-6403	0	0	11,8	-5,86	16,456	-8,083
Мазут (HFO)[52] *		313–413	239,16	-24 240	110	0	6,9372	121	-70	0

\* Тип экспериментальных данных, в уравнениях (15):...+ B<sub>г0</sub> (ρ<sub>20</sub> – 988); B<sub>г0</sub> = 0,3318; ...+ N<sub>г0</sub> (ρ<sub>20</sub> – 988); N<sub>г0</sub> = -0,02027.

Предложенный метод применим для определения констант уравнения состояния в форме полиномов (19), (20), позволяющих аппроксимировать поведение констант в зависимости от температуры. Это особенно важно при учете нагрева топлива в насосе высокого давления, а также при дросселировании топлива в форсунке. Метод прост и не требует реализации сложных математических зависимостей. Точность метода обеспечивается обработкой экспериментальных данных с проверкой адекватности аппроксимаций. Использование предлагаемого алгоритма позволяет в относительно короткие сроки создать широкую базу данных для моторных топлив и других жидкостей, пригодную для использования в практических расчетах течений с высокими давлениями.

Приведенный метод поиска констант применим для последующего расчета упругих свойств других жидкостей, например, технической воды, хлоргексана и диизодецифталата.

Рекомендации по расчету констант уравнения состояния (14) с помощью полиномов (19), (20) учитывают нелинейное и весьма сильное влияние температуры на упругие свойства различных моторных топлив и других жидкостей.

В будущем авторы планируют расширять номенклатуру констант уравнения состояния для новых топлив и их смесей.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Herrmann O. Ultra high pressure and enhanced multiple injection — potentials for the diesel engine and challenge for the fuel injection system. *Fuel Systems for IC Engines*, 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 Cong.*, 2010, p. 50.
- [3] Pflaum S., Wloka J., Wachtmeister G. Emission reduction potential of 3000 bar Common Rail Injection and development trends. *CIMAC Cong.*, 2010, p. 195.
- [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] Alavianmehr M.V., El-Shaikh M., Akbari F. 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: <https://doi.org/10.1016/j.fluid.2017.03.004>

- [7] Heywood J.B. Internal combustion engine fundamentals. New York, McGraw-Hill, 1988.
- [8] Garrappa R., Lino P., Maione G., et al. Model optimization and flow rate prediction in electro-injectors of diesel injection systems. *IFAC-PapersOnLine*, 2016, vol. 49, no. 11, pp. 484–489. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.08.071>
- [9] Aquing M., Ciotta F., Creton B., et al. Composition analysis and viscosity prediction of complex fuel mixtures using a molecular-based approach. *Energy Fuels*, 2012, vol. 26, no. 4, pp. 2220–2230. DOI: <https://doi.org/10.1021/ef300106z>
- [10] Münster A. Classical thermodynamics. London, Wiley-Interscience, 1970.
- [11] 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>
- [12] 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>
- [13] Жердев А.А. Определение термодинамических свойств хладагентов с помощью уравнения состояния Редлиха — Квонга. *Вестник Международной академии холода*, 2002, № 2, с. 30–32.
- [14] 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 multi-component refrigerant blend comprising the working fluid of a low-temperature throttling refrigeration unit. *Chem. Petrol Eng.*, 2020, vol. 56, no. 5-6, pp. 393–402. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10556-020-00786-9>
- [15] Benedict M., Webb G.B., Rubin L.C. An empirical equation for thermodynamic properties of light hydrocarbons and their mixtures. Methane, ethane, propane and n-butane. *J. Chem. Phys.*, 1940, vol. 8, no. 4, art. 334. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.1750658>
- [16] 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>
- [17] 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.
- [18] Shi F., Chen J. New state equation for biodiesel derived from molecular adiabatic compressibility under high pressure and high temperature. *Fuel*, 2015, vol. 158, pp. 582–590. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2015.06.002>
- [19] Tammann G. Ueber die Beziehungen zwischen den inneren Kräften und Eigenschaften der Lösungen. Leipzig, L. Voss, 1907.
- [20] Rowane A.J., Babu M.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>

- [21] Kolev N.I. Thermodynamic and transport properties of diesel fuel. In: Multi-phase flow dynamics 4. Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag, 2012, pp. 293–327. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-642-20749-5\\_13](https://doi.org/10.1007/978-3-642-20749-5_13)
- [22] 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>
- [23] 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 140 MPa. *J. Chem. Thermodyn.*, 2010, vol. 42, no. 5, pp. 631–639. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jct.2009.12.002>
- [24] Cole R.H. Underwater explosions. Princeton, Princeton University Press, 1948.
- [25] 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>
- [26] Грехов Л.В. Научные основы разработки систем топливоподачи в цилиндры двигателей внутреннего сгорания. Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. М., МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1999.
- [27] 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>
- [28] Грехов Л.В., Неговора А.В., Давлетов А.Ф. Экспериментальное определение характеристики впрыскивания при стендовых испытаниях дизельной топливной аппаратуры. *Грузовик*, 2012, № 10, с. 34–40.
- [29] Bosch W. Der Einspritzgesetz-indikator, ein neues Meßgerät zur direkten Bestimmung des Einspritzgesetzes von Einzeleinspritzungen. *Motortech*, 1964, no. 7, pp. 268–282.
- [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. Thermodyn.*, 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. *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 300 MPa. *Fuel*, 2014, vol. 115, pp. 740–748. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.07.103>
- [33] Кадиата Э.Ч., Славущкий В.М., Курапин А.В. и др. Сжимаемость пальмового масла и его смесей с дизельным топливом. *Вестник Иркутского государственного технического университета*, 2018, т. 22, № 10, с. 178–188. DOI: <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2018-10-178-188>

- [34] Alptekin E., Canakci M. Determination of the density and the viscosities of bio-diesel-diesel fuel blends. *Renew. Energy*, 2008, vol. 33, no. 12, pp. 2623–2630. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2008.02.020>
- [35] Safarov J., Ashurova U., Ahmadov B., et al. Thermophysical properties of Diesel fuel over a wide range of temperatures and pressures. *Fuel*, 2018, vol. 216, pp. 870–889. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.11.125>
- [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] 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>
- [38] 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>
- [39] Dashti H.H., Riazi M.R. Acoustic velocities in petroleum fluids: measurement and prediction. *J. Pet. Sc. Eng.*, 2014, vol. 124, pp. 94–104. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2014.10.013>
- [40] 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>
- [41] 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>
- [42] Dhakal S., Tay W.J., Saif al-Ghafri 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. of Thermophys.*, 2021, vol. 42, no. 12, art. 169. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10765-021-02917-7>
- [43] 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>
- [44] 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>
- [45] 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>

[46] Chorążewski M., Dergal F., Sawaya T., et al. Thermophysical properties of Normaf fluid (ISO 4113) over wide pressure and temperature ranges. *Fuel*, 2013, vol. 105, pp. 440–450. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2012.05.059>

[47] 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>

[48] 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>

[49] 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. 207, art. 112427.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fluid.2019.112427>

[50] 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 140 MPa. *J. Chem. Thermodyn.*, 2010, vol. 42, no. 5, pp. 631–639. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jct.2009.12.002>

[51] Грехов Л.В., Габитов И.И., Неговора А.В. Конструкция, расчет и технический сервис топливоподающих систем дизелей. М., Изд-во Легион-Автодата, 2013.

[52] Фомин Ю.Я. Топливная аппаратура судовых дизелей. М., Транспорт, 1966.

**Грехов Леонид Вадимович** — д-р техн. наук, профессор кафедры «Комбинированные двигатели и альтернативные энергоустановки» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

**Марков Владимир Анатольевич** — д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Комбинированные двигатели и альтернативные энергоустановки» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

**Арсенов Никита Александрович** — студент магистратуры кафедры «Комбинированные двигатели и альтернативные энергоустановки» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

**Чжао Цзяньхуэй** — д-р техн. наук, профессор Колледжа энергетики и энергетического машиностроения Харбинского инженерного университета (Китай, 150001, Харбин, ул. Наньтун, 145).

**Са Бовэнь** — аспирант кафедры «Комбинированные двигатели и альтернативные энергоустановки» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).



**Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:**

Грехов Л.В., Марков В.А., Арсенов Н.А. и др. Определение констант уравнения состояния для расчета упругих свойств различных моторных топлив и технических жидкостей. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2022, № 4 (143), с. 108–137. DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3941-2022-4-108-137>

**DETERMINATION OF THE CONSTANTS OF THE EQUATION OF STATE FOR CALCULATING THE ELASTIC PROPERTIES OF VARIOUS ENGINE FUELS AND TECHNICAL FLUIDS**

L.V. Grekhov<sup>1</sup>

V.A. Markov<sup>1</sup>

N.A. Arsenov<sup>1</sup>

J. Zhao<sup>2</sup>

B. Sa<sup>1</sup>

grekhov@bmstu.ru

markov58@bmstu.ru

nicitaarsenov@yandex.ru

zhaojianhui@hrbeu.edu.cn

bowensa@yandex.ru

<sup>1</sup> Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

<sup>2</sup> Harbin Engineering University, Harbin, China

**Abstract**

The creation of modern mathematical models of unsteady high-pressure fuel injection in engines requires the replacement of universal empirical equations for one of the elastic properties of fuel by a mathematically more correct equation of state. The necessity of the existence and use of convenient and simple forms of the equation of state, allowing the values of density, compressibility factor and sound velocity of traditional and alternative fuels for diesel engines to be determined quickly and with sufficient accuracy, has been substantiated. Modern approaches to the description of the state of droplet and two-phase liquids are analyzed. The absence of phase transitions in the process of fuel delivery under high pressures has allowed to substantiate the possibility of using the equation of state for the forward and backward account. An equation of state adequate to processes with high and ultrahigh pressures (up to 400 MPa) and moderately high temperatures (up to 460 K) has been proposed. The equipment used and the method of obtaining empirical information through determination of the current sound velocity are described. A method for calculating the values of constants of the chosen form of the equation of state in the form of expressions determining their dependence on temperature and an algorithm for calculating

**Keywords**

*Fuel supply equipment, equation of state, fuel, alternative fuels, ultrahigh pressures, constants of the equation of state, elastic properties of fuels*

the constants of the equation of state in processing experimental data are presented. Based on literature data, as well as the results of studies conducted, sets of empirical equation of state constants for 49 diesel fuels, various test and technical fluids, and alternative motor fuels are obtained

Received 03.06.2022

Accepted 01.07.2022

© Author(s), 2022

---

*The research was supported by RSF (project no. 21-49-00012)*

## REFERENCES

- [1] Herrmann O. Ultra high pressure and enhanced multiple injection — potentials for the diesel engine and challenge for the fuel injection system. *Fuel Systems for IC Engines*, 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 Cong.*, 2010, p. 50.
- [3] Pflaum S., Wloka J., Wachtmeister G. Emission reduction potential of 3000 bar Common Rail Injection and development trends. *CIMAC Cong.*, 2010, p. 195.
- [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] Alavianmehr M.V., El-Shaikh M., Akbari F. 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: <https://doi.org/10.1016/j.fluid.2017.03.004>
- [7] Heywood J.B. Internal combustion engine fundamentals. New York, McGraw-Hill, 1988.
- [8] Garrappa R., Lino P., Maione G., et al. Model optimization and flow rate prediction in electro-injectors of diesel injection systems. *IFAC-PapersOnLine*, 2016, vol. 49, no. 11, pp. 484–489. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.08.071>
- [9] Aquing M., Ciotta F., Creton B., et al. Composition analysis and viscosity prediction of complex fuel mixtures using a molecular-based approach. *Energy Fuels*, 2012, vol. 26, no. 4, pp. 2220–2230. DOI: <https://doi.org/10.1021/ef300106z>
- [10] Münster A. Classical thermodynamics. London, Wiley-Interscience, 1970.
- [11] 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>
- [12] 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>

- [13] Zherdev A.A. Determination of thermodynamic properties of refrigerants with the help of the equation of state of Redlich — Quong. *Vestnik Mezhdunarodnoy akademii khooloda* [Journal of International Academy of Refrigeration], 2002, no. 2, pp. 30–32 (in Russ.).
- [14] 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. Petrol Eng.*, 2020, vol. 56, no. 5-6, pp. 393–402.  
DOI: <https://doi.org/10.1007/s10556-020-00786-9>
- [15] Benedict M., Webb G.B., Rubin L.C. An empirical equation for thermodynamic properties of light hydrocarbons and their mixtures. Methane, ethane, propane and n-butane. *J. Chem. Phys.*, 1940, vol. 8, no. 4, art. 334.  
DOI: <https://doi.org/10.1063/1.1750658>
- [16] 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>
- [17] Aleksandrov I.S., Grigoryev 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.).
- [18] Shi F., Chen J. New state equation for biodiesel derived from molecular adiabatic compressibility under high pressure and high temperature. *Fuel*, 2015, vol. 158, pp. 582–590. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2015.06.002>
- [19] Tammann G. Ueber die Beziehungen zwischen den inneren Kraefen und Eigenschaften der Losungen. Leipzig, L. Voss, 1907.
- [20] Rowane A.J., Babu M.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>
- [21] Kolev N.I. Thermodynamic and transport properties of diesel fuel. In: *Multiphase flow dynamics 4*. Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag, 2012, pp. 293–327.  
DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-642-20749-5\\_13](https://doi.org/10.1007/978-3-642-20749-5_13)
- [22] 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>
- [23] 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 140 MPa. *J. Chem. Thermodyn.*, 2010, vol. 42, no. 5, pp. 631–639.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jct.2009.12.002>
- [24] Cole R.H. Underwater explosions. Princeton, Princeton University Press, 1948.
- [25] 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>

- [26] Grekhov L.V. Nauchnye osnovy razrabotki sistem toplivopodachi v tsilindry dvigatelya vnutrennego sgoraniya. Avtoref. dis. d-ra tekhn. nauk [Scientific basis of fuel delivery system to the internal combustion engine cylinders. Abs. Dr. Sc. (Eng.). Diss.]. Moscow, Bauman MSTU, 1999 (in Russ.).
- [27] 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>
- [28] Grekhov L.V., Negovora A.V., Davletov A.F. Experimental determination of injection characteristics in rig tests for diagnosing technical state of diesel engine fuel equipment. *Gruzovik*, 2012, no. 10, pp. 34–40 (in Russ.).
- [29] Bosch W. Der Einspritzgesetz-indikator, ein neues Meßgerät zur direkten Bestimmung des Einspritzgesetzes von Einzeleinspritzungen. *Motortechn*, 1964, no. 7, pp. 268–282.
- [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. Thermodyn.*, 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. *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 300 MPa. *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. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Proceedings of Irkutsk State Technical University], 2018, vol. 22, no. 10, pp. 178–188 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2018-10-178-188>
- [34] 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>
- [35] Safarov J., Ashurova U., Ahmadov B., et al. Thermophysical properties of Diesel fuel over a wide range of temperatures and pressures. *Fuel*, 2018, vol. 216, pp. 870–889. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.11.125>
- [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] 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>

- [38] 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>
- [39] Dashti H.H., Riazi M.R. Acoustic velocities in petroleum fluids: measurement and prediction. *J. Pet. Sc. Eng.*, 2014, vol. 124, pp. 94–104.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2014.10.013>
- [40] 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>
- [41] 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>
- [42] Dhakal S., Tay W.J., Saif al-Ghafri 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. of Thermophys.*, 2021, vol. 42, no. 12, art. 169.  
DOI: <https://doi.org/10.1007/s10765-021-02917-7>
- [43] 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>
- [44] 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>
- [45] 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>
- [46] Chorążewski M., Dergal F., Sawaya T., et al. Thermophysical properties of Normafluid (ISO 4113) over wide pressure and temperature ranges. *Fuel*, 2013, vol. 105, pp. 440–450. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2012.05.059>
- [47] 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>
- [48] 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>
- [49] 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. 207, art. 112427. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fluid.2019.112427>

[50] 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 140 MPa. *J. Chem. Thermodyn.*, 2010, vol. 42, no. 5, pp. 631–639.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jct.2009.12.002>

[51] Grekhov L.V., Gabitov I.I., Negovora A.V. *Konstruktsiya, raschet i tekhnicheskiy servis toplivopodayushchikh sistem dizeley* [Design, calculation and technical maintenance of diesel fuel delivery systems]. Moscow, Legion-Avtodata Publ., 2013.

[52] Fomin Yu.Ya. *Toplivnaya apparatura sudovykh dizeley* [Fuel equipment of ship diesel engines]. Moscow, Transport Publ., 1966.

**Grekhov L.V.** — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Department of Combined Engines and Alternative Power Plants, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

**Markov V.A.** — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Head of the Department of Combined Engines and Alternative Power Plants, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

**Arsenov N.A.** — Master's Degree Student, Department of Combined Engines and Alternative Power Plants, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

**Zhao J.** — Dr. Sc. (Eng.), Professor, College of Energy and Power Engineering, Harbin Engineering University (Nantong ul. 145, Harbin, 150001 China).

**Sa B.** — Post-Graduate Student, Department of Combined Engines and Alternative Power Plants, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

**Please cite this article in English as:**

Grekhov L.V., Markov V.A., Arsenov N.A., et al. Determination of the constants of the equation of state for calculating the elastic properties of various engine fuels and technical fluids. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Mechanical Engineering*, 2022, no. 4 (143), pp. 108–137 (in Russ.).

DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3941-2022-4-108-137>