**МЕЖГОСУДАРСТВЕННАЯ СИСТЕМА ДАННЫХ**

**О ФИЗИЧЕСКИХ КОНСТАНТАХ И СВОЙСТВАХ**

**ВЕЩЕСТВ И МАТЕРИАЛОВ**

УДК 536.411

**ТАБЛИЦЫ СТАНДАРТНЫХ СПРАВОЧНЫХ ДАННЫХ**

#### КРИТИЧЕСКИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ И КРИТИЧЕСКИЕ ДАВЛЕНИЯ ТЕРМОНЕСТАБИЛЬНЫХ ВЕЩЕСТВ

#### **ССД СНГ 357–2021 (ГСССД 357–2019)**

(**ОКОНЧАТЕЛЬНАЯ РЕДАКЦИЯ, ШИФР ТЕМЫ:** [**RU.3.006-20**](http://www.mgs.gost.ru/TKSUGGEST/mgsprogact.nsf/ByUNID/E336D4892C3CC6BF44257BCE003A3FE5?OpenDocument&CountryCode=RU&ViewName=ByMTCOfSelectedCountry&Category=RU%20180&Start=1&Count=12)**21)**

РАЗРАБОТАНЫ Межгосударственным техническим комитетом по стандартизации МТК-180 «Межгосударственная служба стандартных справочных данных»

ВНЕСЕНЫ Федеральным агентством по техническому регулированию и метрологии

АВТОРЫ: Е.Д. Никитин, А.П. Попов, П.В. Попов

СОГЛАСОВАНЫ с национальными органами по стандартизации стран СНГ:

РЕКОМЕНДОВАНЫ Научно-технической комиссией по метрологии Межгосударственного Совета по стандартизации, метрологии и сертификации

ПРИНЯТЫ Евразийским советом по стандартизации, метрологии и сертификации

(протокол 2021 г., № –2021)

УДК 536.411

**МЕЖГОСУДАРСТВЕННАЯ СИСТЕМА ДАННЫХ**

**О ФИЗИЧЕСКИХ КОНСТАНТАХ И СВОЙСТВАХ**

**ВЕЩЕСТВ И МАТЕРИАЛОВ**

|  |  |
| --- | --- |
| **Таблицы стандартных справочных данных** |  |
| Критические температуры и критические давления термонестабильных веществ | **ССД СНГ**  **357–2021**  **ГСССД**  **357–2019** |
| **Tables of Standard Reference Data** |  |
| The сritical temperatures and critical pressures of thermo unstable substances | **SSD CNG**  **357–2021**  **GSSSD**  **357–2019** |

**АННОТАЦИЯ**

Приведены стандартные справочные данные о критических температурах и критических давлениях 90 термически нестабильных веществ и 9 стабильных веществ и погрешности их определения. Измерения выполнены на высокочистых образцах веществ по аттестованной методике ГСССД МЭ 163-2010. При разработке стандартных справочных данных учитывались все имеющиеся в литературе результаты измерений критических свойств этих веществ. Большинство исследованных веществ являются термически нестабильными, т.е. их разложение начинается при температурах ниже критической температуры.

Относительная расширенная неопределенность определения критического давления равна 0,03, а – критической температуры 0,01 при доверительной вероятности 0,95.

**СОДЕРЖАНИЕ**

1. Введение 6

2. Основная часть 7

3. Заключение 22

Список литературы 23

5. Приложение 31

1. **ВВЕДЕНИЕ**

Критические параметры – критическая температура, критическое давление, критическая плотность (или критический объем) – являются важными физико-химическими характеристиками чистого вещества. Критическая точка определяет верхнюю границу существования двухфазной области. Критические константы используются во многих корреляциях в качестве параметров приведения. Информация о критических параметрах дает возможность построить уравнение состояния вещества, рассчитать с приемлемой точностью по теории термодинамического подобия его теплофизические свойства, надежно экстраполировать в область высоких температур результаты низкотемпературных измерений поверхностного натяжения, давления и плотности насыщенного пара. Изложенные соображения позволили Томасу Дауберту поставить критические свойства на первое место в предложенной им иерархии теплофизических свойств вещества [1].

Критическая точка жидкость-пар была открыта бароном де ла Туром в 1822 г. [2]. С того времени, в течение почти 200 лет, проводятся измерения критических параметров веществ. Однако число веществ, для которых критические константы определены экспериментально сравнительно невелико. Оценки экспертов разнятся, т.к. базы данных нередко содержат не только экспериментальные данные, но и результаты расчетов. В серии обзоров, подготовленных комиссией ИЮПАК по термодинамике и опубликованных в 1995-2015 г.г., в которые включены только результаты измерений, критическая температура приведена приблизительно для 1000 веществ, критическое давление – для 800 соединений, а критическая плотность – для 500 веществ [3-14]. Таким образом, получение надежных экспериментальных данных о критических свойствах индивидуальных веществ является актуальной задачей.

В настоящее время критические параметры используются для характеристики как обычных, стабильных соединений, так и соединений термонестабильных, т. е. веществ, термическое разложение которых начинается при температурах, меньших критической. При этом под критической точкой термонестабильного соединения понимают гипотетическую критическую точку, которую данное вещество имело бы в отсутствие разложения. Именно это определение критической точки нестабильного соединения будет использоваться нами в настоящей работе.

Измерение критических свойств нестабильных соединений предполагает применение специальных методик. Главное требование к таким методикам – малое время нахождения образца исследуемого соединения при околокритических температурах, что снижает его терморазложение. Разработанная нами «Методика экспериментального определения критической температуры и критического давления индивидуальных веществ ГСССД МЭ 163-2010» [15] предназначена в первую очередь для измерения критических параметров термонестабильных соединений, хотя с ее помощью можно измерять критические константы и стабильных веществ.

**2. ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ**

Методика измерения критической температуры и критического давления веществ, которая использовалась в настоящей работе, детально изложена в рукописи [15], поэтому приведем только предельно краткое описание этой методики. Исследуемая жидкость заполняет фторопластовый стаканчик с тонкими стенками, которые служат для передачи давления. Давление снаружи стаканчика создается прессом и измеряется манометром. Внутри стаканчика находится измерительный зонд – платиновая проволока диаметром 0.02 мм и длиной (1-3) см. Зонд служит одновременно нагревателем и термометром сопротивления. На зонд подаются одиночные прямоугольные импульсы напряжения от генератора; во время импульса происходит нагрев зонда протекающим током. Напряжение импульса подбирается таким образом, что к концу импульса зонд и слой жидкости вокруг него нагреваются до температуры достижимого перегрева; происходит вскипание жидкости. Время от начала импульса нагрева до момента вскипания составляет от 0.01 до 1 мс. В момент вскипания резко изменяются условия теплоотдачи от зонда в жидкость, что приводит к возникновению возмущения температуры зонда. Момент вскипания и амплитуда температурного возмущения фиксируется электронной аппаратурой. Температура зонда в момент вскипания определяется по его сопротивлению. В результате измеряется температура, при которой начинается вскипание жидкости при заданном давлении (температура достижимого перегрева жидкости). В опытах измеряется зависимость температуры достижимого перегрева от давления – линия достижимого перегрева. При увеличении давления линия достижимого перегрева заканчивается в критической точке.

С ростом давления свойства жидкости и пара сближаются, и амплитуда температурного возмущения падает. Давление, при котором амплитуда отрицательного температурного возмущения снижается до уровня чувствительности установки ( К), принимается равным измеренному значению критического давления , а температура вскипания при этом давлении – измеренному значению критической температуры . Опыты с хорошо исследованными жидкостями показали, что величины  и  всегда меньше истинных значений критического давления  и критической температуры . Разработан метод введения поправок к измеренным значениям критических параметров, который по значениям  и  позволяет рассчитать величины  и .

Неопределенности измерения критических параметров были детально рассмотрены в нашей работе [15]. Для низкомолекулярных неассоциированных соединений относительная неопределенность типа А для измерения критического давления составляет 0,01, а для измерения критической температуры – 0,001. Неопределенность типа Б оценивается нами в 0,02 для критического давления и 0,009 для критической температуры. Таким образом, относительная расширенная неопределенность измерения критического давления равна 0,03, а измерения критической температуры 0,01 при доверительной вероятности 0.95.

Для веществ с водородными связями и высоким ацентрическим фактором () относительная неопределенность типа А для измерения критического давления составляет 0,01, и относительная неопределенность типа А для измерения критической температуры – 0,001. Неопределенность типа Б равняется 0,03 для критического давления и 0,014 для критической температуры. Следовательно, относительная расширенная неопределенность измерения критического давления равна 0,04, а измерения критической температуры – 0,015 при доверительной вероятности 0,95.

Образцы исследованных веществ была приобретена у фирм Aldrich, Sigma, Fluka, Alfa Aesar и других. Образцы некоторых соединений были синтезированы в Институте органического синтеза УрО РАН (ИОС) под руководством д.х.н. Ю.Г. Ятлука. Чистота исследованных образцов в соответствии с сертификатами фирм-производителей приведена в Приложении (Табл. 2).

Измерения критической температуры и критического давления с помощью методики ГСССД МЭ 163-2010 проводились как для стабильных, так и для нестабильных веществ. Большинство исследованных соединений являлись термически нестабильными. Критические свойства стабильных веществ измерялись с целью проверки применимости разработанного метода к конкретному гомологическому ряду и оценки реальной погрешности измерений. Полученные значения критических свойств были сопоставлены с литературными данными для стабильных и нестабильных соединений в рукописи [16]. Было показано, что результаты, полученные с помощью методики ГСССД МЭ 163-2010, в пределах погрешности измерений совпадают с данными, поученными в наиболее авторитетных лабораториях. Это свидетельствует о высокой надежности разработанного нами метода измерений критических свойств веществ.

В Таблице 1 приведены стандартные справочные данные о критической температуре и критическом давлении ряда органических веществ. Для подавляющего числа веществ эти данные получены единственным методом – с помощью методики ГСССД МЭ 163-2010, т.к. другие известные методики измерения критических параметров термонестабильных соединений не позволяют провести необходимые измерения из-за сильного разложения этих веществ в процессе измерений. Для сравнительно небольшого числа соединений имеются экспериментальные данные, полученные другими методами. Результаты этих экспериментов учитывались при разработке Табл. 1.

Вещества расположены в табл. 1 в порядке, который был использован в обзорах [4–14]. Рассмотрим отдельные гомологические ряды.

**Нормальные алканы.** Алканы от метана до *н*-декана включительно стабильны в критической точке. Все более тяжелые *н*-алканы нестабильны [4]. Рекомендованные значения критических параметров *н*-алканов  с *n* от 1 до 18 приведены в обзорах [4, 14] Нами были измерены критическая температура и критическое давление *н*-алканов с числом атомов углерода в молекуле от 19 до 36 [17, 18]; позднее аналогичные измерения были выполнены для н-алканов с числом атомов углерода 40, 44 и 60 [19]. В работе [19] был предложен новый, более точный метод расчета поправок к значениям критических параметров, измеренных методом импульсного нагрева. С помощью этого метода результаты измерений, опубликованные в [17, 18], были пересчитаны. Уточненные таким образом значения критических параметров *н*-алканов приведены в Табл.1.

***н*-Алкилциклогексаны.** Термическая стабильность циклогексанов в жидкой фазе мало исследована. В целом, циклоалканы менее устойчивы, чем их ациклические аналоги. Однако циклогексан является полностью ненапряженным соединением и, скорее всего, циклогексан и метилциклогексан стабильны в критической точке. Критические свойства этих двух соединений многократно измерялись разными авторами. Подборку результатов измерений можно найти в обзорaх [7, 14]. Нами с помощью методики ГСССД МЭ 163-2010 измерены критическая температура и критическое давление н-алкилциклогексанов от циклогексана до бутилциклогексана [20]. Кроме того, критическая температура нескольких *н*-алкилциклогексанов была измерена Мортоном и соавторами [21] и Имелсом и соавторами [22]. Оценка критических свойств этил-, пропил- и бутилциклогексанов, приведенных в Табл. 1, сделана с учетом результатов работ [20–22].

**Алкилнафталины.** Нафталин стабилен в критической точке. Его критические свойства хорошо измерены; результаты этих измерений собраны в обзорах [5, 14]. Однако алкилнафталины нестабильны в своих критических точках [23]. С использованием методики ГСССД МЭ 163-2010 нами были измерены критическая температура и критическое давление пяти алкилнафталинов [24]. Кроме того, Амброуз измерил критические температуры 1-метилнафталина и 2-метилнафталина [23]. Вилсон и соавторы [25] измерили давление насыщенного пара 1-метилнафталина и рассчитали критическое давление путем экстраполяции полученных данных до критической температуры, измеренной Амброузом. Результаты наших измерений критических свойств 1-метилнафталина и 2-метилнафталина в пределах погрешности измерений согласуются с данными работ [23, 25].

**Полициклические ароматические углеводороды.** В работе  [26] нами были измерены критические параметры пяти полициклических ароматических углеводорода. Все исследованные соединения разлагаются в критической точке.

**Диолы.** Все диолы нестабильны в критической точке. Критическая температура и критическое давление диолов HO(CH2)nOH c, 4, 5, 6, 8, 9, 10, 12 были измерены в нашей работе [27], а критические параметры 2,2-диметил-1,3-пропандиола –в работе [28] Группой Вилсона были измерены критические свойства 1,3-пропандиола, 1,4-бутандиола и 1,6-гександиола [29–32]. Рекомендованные значения критических свойств, приведенные в Табл.1., даны с учетом всех имеющихся экспериментальных данных.

**Этиленгликоли.** Этиленгликоли H(OCH2CH2)nOH образуют гомологический ряд, все члены которого разлагаются в критической точке. Критические параметры этиленгликолей измерялись нами в работах [33–35]. Критические константы этиленгликолей измеряли также Лайонс [36], Тежа и Анселм [37], Тежа и Розентал [38], ФонНидерхаузерн и со-авторы [30], Анселм и Тежа [39]. Стил и со-авторы измерили давление насыщенного пара диэтиленгликоля [40] и триетиленгликоля [41] и представили результаты измерений в виде уравнения Вагнера-Амброуза. Затем они рассчитали критическое давление диэтиленгликоля, взяв критическую температуру равной значению, измеренному в нашей работе [34]. Для триэтиленгликоля они положили критическую температуру  K и рассчитали критическое давление. Рекомендованные критические свойства в Табл.1 определены с учетом данных работ [30,33–41].

**Метиловые эфиры жирных кислот.** Начальные члены гомологического ряда метиловых эфиров н-алкановых кислот CnH2n-1O2CH3 стабильны в критической точке, однако более тяжелые эфиры нестабильны; так метил этаноат и метил пентаноат стабильны при околокритических температурах [42,43], но метил гептаноат уже нестабилен [44], а метил додеканоат быстро разлагается при критической температуре [23]. C помощью методики ГСССД МЭ 163-2010 нами выполнены измерения критической температуры и критического давления эфиров с *n* = 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 14, 16, 18 [28,45]. Ранее была измерена критическая температура метил гептаноата (Мортон и со-авторы [44]) и метил додеканоата (Амброуз  [23]. Результаты этих работ учтены при определении рекомендованных значений критических свойств.

Нами также были измерены критические параметры четырех метиловых эфиров ненасыщенных жирных кислот: метил олеата [28], метил линолеата, метил линолената и метил эруката [46].

**Этиловые эфиры н-алкановых кислот.** Подобно ситуации во многих других гомологических рядах, несколько первых членов ряда этиловых эфиров н-алкановых кислот стабильны в критической точке, но, начиная с некоторого члена, все соединения с большей молярной массой нестабильны. Этил этаноат стабилен в критической точке [42], тогда как этил октаноат разлагается при околокритических температурах [44]. Результаты измерений критической температуры и критического давления этиловых эфиров н-алкановых кислот CnH2n-1O2C2H5 с *n* = 10, 11, 12, 14, 16 были представлены нами в работе [47].

**Диэтиловые эфиры дикарбоновых кислот.** Вероятно, все диэтиловые эфиры дикарбоновых кислот нестабильны в критической точке. Рэдис наблюдал разложение диэтил бутандиоата во время измерения критической температуры [48]. Стил и со-авторы [49] и ФонНидерхаузерн и со-авторы [50] измерили критические свойства диэтил этандиоата с помощью специальных методов, значительно уменьшающих разложение исследуемого соединения. Мы, используя методику ГСССД МЭ 163-2010, выполнили измерения критической температуры и критического давления диэтиловых эфиров дикарбоновых кислот C2H5O2CnH2n–4O2C2H5 с числом атомов углерода в материнской кислоте *n* = 3, 4, 5, 6, 8, 10 [51–53]. При определении рекомендованных значений критических свойств диэтил бутандиоата были приняты во внимание результаты измерений Рэдиса [48] и Стила и со-авторов [49].

**Алифатические симметричные простые эфиры H(CH2)nO(CH2)nH.** Сведения о термической стабильности простых эфиров в критической точке достаточно противоречивы. Полихрониди и со-авторы [54] наблюдали термическое разложение диэтилового эфира при околокритических температурах. Для дипропилового эфира Амброуз и соавторы [55] не обнаружили зависимость критической температуры от времени измерений, что указывало бы на разложение вещества, в то время как Лианг и соавторы [56] зафиксировали изменение критической температуры с 533 до 535 К, когда время пребывания образца в критической точке увеличивалось с 6 до 15 с. Точилкин и Янг [57] ничего не пишут о термической стабильности дибутилового эфира, критические свойства которого они измеряли. Нами выполнены измерения критических параметров дигексилового, диоктилового и дидецилового эфиров [58].

**Триглицериды.** Насыщенные триглицериды C3H5[CnH2n-1O2]3 не являются очень прочными соединениями. Измеряя теплоемкость трилаурина (*n* = 12), Морад и со-авторы [59] обнаружили, что на воздухе трилаурин начинал разлагаться при 423 К. В атмосфере азота они сумели измерить теплоемкость трилаурина до температуры 523 К; однако при 443 К наблюдался излом на зависимости теплоемкости от температуры, что говорит об изменениях в образце при температурах выше 443 К. Критическая температура триглицеридов, измеренная нами, лежит в интервале 836-925 К; можно предположить, что триглицериды интенсивно разлагаются при околокритических температурах. Результаты наших измерений критических параметров четырех триглицеридов [60] приведены в Табл.1.

**Ароматические C-H-O соединения.** Критические параметры девяти ароматических соединений, молекулы которых содержат атомы углерода, водорода и кислорода, были измерены с использованием методики ГСССД МЭ 163-2010 в работе [28]. Ранее измерения критических свойств проводились лишь для двух соединений: бензальдегида [9] и фенилметанола [61]. Данные этих работ учитывались при определении рекомендованных значений критических свойств указанных соединений.

**Органические серусодержащие соединения.** Нами были измерены критическая температура и критическое давление диметилсульфоксида [62]. Диметилсульфоксид не относится к числу стабильных соединений, по данным многих авторов диметилсульфоксид разлагается уже при температуре нормального кипения (462.5 К). Лам и соавторы установили, что диметилсульфоксид начинает разлагаться при температуре 468 К [63]. Янг и соавторы нашли, что температура начала разложения диметилсульфоксида составляет 472.55 К [64]. Эти температуры значительно ниже критической температуры, измеренной нами (718 К).

**Азотсодержащие циклические соединения.** Пиридин и его производные нестабильны в критической точке. Амброуз и Грант [65] указывают, что образцы пиридина, 2-, 3- и 4-метилпиридинов, а также 2,4- и 2,6-диметилпиридинов быстро изменяли свой цвет при околокритических температурах, хотя это не всегда сопровождалось изменением критической температуры. Нами с помощью методики ГСССД МЭ 163-2010 были измерены критические свойства 2-, 3-, 4-метилпиридинов и 2-метил-5-этилпиридина [66].

Нами также измерены критические параметры 1,4-, 2,6-диметилпиперазинов и капролактама [62]. Известно, что пиперазин разлагается в критической точке; тем не менее, Стил и со-авторы [67] и ФонНидерхаузерн и со-авторы [32] измерили критические свойства пиперазина, используя специальные методы. Можно с высокой долей вероятности предположить, что 1,4- и 2,6-диметилпиперазины также нестабильны в критической точке. Интенсивное разложение капролактама при температурах выше 550 К наблюдали Стил и со-авторы во время измерений давления насыщенного пара [41].

**Ферроцен и его производные.** Нами измерены критические параметры ферроцена, *н*-бутилферроцена, 1-ацетилферроцена и бензоилферроцена – веществ, которые относятся к металлоорганическим сэндвичевым соединениям [68]. Ферроцен – довольно стабильное соединение, оно выдерживает нагрев в вакууме до 500 оС без разложения. Однако его производные не так стабильны; в наших опытах наблюдалось существенное разложение 1-ацетилферроцена и бензоилферроцена.

**Тетраалкоксисиланы и тетраалкоксититаны.** Экспериментальные значения критических констант тетраалкоксисиланов и тетраалкоксититанов с линейными алкильными цепочками, измеренные нами, были опубликованы в работах [69,70]. Критические параметры этих соединений с разветвленным строением алкильных цепочек были представлены в нашей работе [71] и помещены в Табл.1.

Таблица 1 – Стандартные справочные данные о критической температуре и критическом давлении индивидуальных веществ

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Вещество | Химическая формула | | /МПа | | /K | |
| Нормальные алканы | | | | | | |
| Нонадекан  Эйкозан  Генэйкозан  Докозан  Трикозан  Тетракозан  Гексакозан  Октакозан  Триаконтан  Гексатриаконтан  Тетраконтан  Тетратетраконтан  Гексаконтан |  | | 1,17 ± 0,05  1,08 ± 0,05  1,04 ± 0.05  0,986 ± 0,05  0,921 ± 0,05  0,871 ± 0,05  0,814 ± 0,05  0,750 ± 0,05  0,690 ± 0,05  0,580 ± 0,05  0,523 ± 0,05  0,482 ± 0,05  0,360 ± 0,05 | | 757 ± 10  769 ± 10  779 ± 10  787 ± 10  791 ± 10  801 ± 10  819 ± 10  836 ± 10  850 ± 10  888 ± 15  904 ± 15  919 ± 15  974 ± 15 | |
| н-Алкилциклогексаны | | | | | | |
| Циклогексан  Метилциклогексан  Этилциклогексан  Пропилциклогексан  Бутилциклогексан | | C6H12  C6H11CH3  C6H11C2H5  C6H11C3H7  C6H11C4H9 | | 4,08 ± 0,05  3,48 ± 0,02  3,13 ± 0,05  2,86 ± 0,10  2,53 ± 0,05 | | 553,6 ± 0,5  572,2 ± 0,2  606,5 ± 0,5  631,0 ± 1  650 ± 2 |

*Продолжение таблицы 1*

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Вещество | Химическая формула | /МПа | | | /K |
| Алкилнафталины | | | | | |
| 1-Метилнафталин  2-Метилнафталин  1,3-Диметилнафталин  1,4-Диметилнафталин  2-Этилнафталин | C10H7CH3  C10H7CH3  C10H6(CH3)2  C10H6(CH3)2  C10H7C2H5 | | 3,57 ± 0,10  3,30 ± 0,10  2,74 ± 0,08  2,79 ± 0,08  2,79 ± 0,08 | 772 ± 1  761 ± 1  772 ± 8  778 ± 8  763 ± 8 | |
| Полициклические ароматические углеводороды | | | | | |
| Аценафтен  Флуорен  Антрацен  Фенантрен  Пирен |  | | 3,70 ± 0,1  3,18 ± 0,1  3,17 ± 0,1  3,25 ± 0,1  3,03 ± 0,1 | 820 ± 8  836 ± 8  894 ± 9  893 ± 9  974 ± 10 | |
| Диолы | | | | | |
| 1,3-Пропандиол  1,4-Бутандиол  1,5-Пентандиол  1,6-Гександиол  1,8-Октандиол  1,9-Ноналдиол  1,10-Декандиол  1,12-Додекандиол  2,2-Диметил-1,3-пропандиол | HO(CH2)3OH  HO(CH2)4OH  HO(CH2)5OH  HO(CH2)6OH  HO(CH2)8OH  HO(CH2)9OH  HO(CH2)10OH  HO(CH2)12OH  HOCH2C(CH3)2CH2OH | | 6,4 ± 0,1  5,8 ± 0,4  4,00 ± 0,16  3,7 ± 0,3  2,70 ± 0,14  2,40 ± 0,10  2,20 ± 0,09  1,93 ± 0,08  4,2 ± 0,2 | 722 ± 3  725 ± 2  731 ± 11  738 ± 4  752 ± 11  760 ± 11  770 ± 12  798 ± 12  687 ± 10 | |

*Продолжение таблицы 1*

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Вещество | Химическая формула | /МПа | /K |
| Этиленгликоли | | | | |
| Моноэтиленгликоль  Диэтиленгликоль  Триэтиленгликоль  Тетраэтиленгликоль  Пентаэтиленгликоль  Гексаэтиленгликоль | HOCH2CH2OH  H(OCH2CH2)2OH  H(OCH2CH2)3OH  H(OCH2CH2)4OH  H(OCH2CH2)5OH  H(OCH2CH2)6OH | 8,2 ± 0,3  4,8 ± 0,3  3,45 ± 0,20  2,7 ± 0,2  2,13 ± 0,09  1,82 ± 0,07 | 720 ± 7  750 ± 10  790 ± 12  815 ± 12 842 ± 13  868 ± 13 | |
| Метиловые эфиры жирных кислот | | | | |
| Метил гексаноат  Метил гептаноат  Метил октаноат  Метил нонаноат  Метил деканоат  Метил ундеканоат  Метил додеканоат  Метил тетрадеканоат  Метил гексадеканоат  Метил октадеканоат  Метил олеат  Метил линолеат  Метил линоленат  Метил эрукат | C6H11O2CH3  C7H13O2CH3  C8H15O2CH3  C9H17O2CH3  C10H19O2CH3  C11H21O2CH3  C12H23O2CH3  C14H27O2CH3  C16H31O2CH3  C18H35O2CH3  C18H33O2CH3  C18H31O2CH3  C18H29O2CH3  C22H41O2CH3 | 2,88 ± 0,09  2,53 ± 0,08  2,34 ±0,07  2,06 ±0,06  1,93 ± 0,06  1,75 ± 0,05  1,52 ± 0,05  1,32 ± 0,04  1,17 ± 0,04  1,08 ± 0,04  1,21 ± 0,04  1,24 ± 0,04  1,44 ± 0,04  0,960 ± 0,03 | 612 ± 6  627 ± 2  646 ± 6  665 ± 7  675 ± 7  694 ± 7  711 ± 2  730 ±7  760 ± 8  785 ± 8  777 ±8  778 ± 8  779 ± 8  817 ± 8 | |

*Продолжение таблицы 1*

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Вещество | Химическая формула | /МПа | /K |
| Этиловые эфиры н-алкановых кислот | | | |
| Этил деканоат  Этил ундеканоат  Этил додеканоат  Этил тетрадеканоат  Этил гексадеканоат | C10H19O2C2H5  C11H21O2C2H5  C12H23O2C2H5  C14H27O2C2H5  C16H31O2C2H5 | 1,74 ± 0,05  1,52 ± 0,05  1,37 ± 0,04  1,27 ± 0,04  1,15 ± 0,04 | 687 ± 7  701 ± 7  718 ± 7  740 ± 7  767 ± 8 |
| Диэтиловые эфиры дикарбоновых кислот | | | |
| Диэтил пропандиоат  Диэтил бутандиоат  Диэтил пентандиоат  Диэтил гександиоат  Диэтил октандиоат  Диэтил декандиоат | C2H5O2C3H2O2C2H5  C2H5O2C4H4O2C2H5  C2H5O2C5H6O2C2H5  C2H5O2C6H8O2C2H5  C2H5O2C8H12O2C2H5  C2H5O2C10H16O2C2H5 | 2,7 ± 0,1  2,3 ± 0,1  2,13 ± 0,06  1,99 ± 0,10  1,57 ± 0,05  1,37 ± 0,04 | 652 ± 7  666 ± 7  683 ± 7  697 ± 7  723 ± 7  740 ± 7 |
| Алифатические симметричные простые эфиры | | | |
| Ди-н-гексиловый эфир  Ди-н-октиловый эфир  Ди-н-дециловый эфир | C6H13OC6H13  C8H17OC8H17  C10H21OC10H21 | 1,44 ± 0,04  1,19 ± 0,04  1,03 ± 0,03 | 665 ± 7  723 ± 7  768 ± 8 |
| Триглицериды | | | |
| Глицерид триоктаноат  Глицерид тридеканоат  Глицерид тридодеканоат  Глицерид тритетрадеканоат | C3H5[C8H15O2]3  C3H5[C10H19O2]3  C3H5[C12H23O2]3  C3H5[C14H27O2]3 | 0,83 ± 0,03  0,75 ± 0,03  0,65 ± 0,03  0,61 ± 0,02 | 836 ± 13  864 ± 13  899 ± 13  925 ± 14 |

*Продолжение таблицы 1*

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Вещество | Химическая формула | /МПа | /K |
| Ароматические C-H-O соединения | | | |
| Фенилметанол  4-(Метилфенил)метанол  Бензойная кислота  2-Метилбензойная кислота  3-Метилбензойная кислота  4-Метилбензойная кислота  2-Карбоксибензальдегид  Бензальдегид  4-Метилбензальдегид | C6H5CH2OH  CH3C6H4CH2OH  C6H5COOH  CH3C6H4COOH  CH3C6H4COOH  CH3C6H4COOH  CHOC6H4COOH  C6H5CHO  CH3C6H4CHO | 4,3 ± 0,1  3,61 ± 0,10  4,53 ± 0,10  3,92 ± 0,12  3,85 ± 0,12  3,80 ± 0,10  4,80 ± 0,15  4,41 ± 0,10  3,80 ± 0,10 | 714 ± 3  719 ± 7  755 ± 8  763 ± 8  771 ± 8  775 ± 8  864 ± 9  693± 7  712 ± 7 |
| Органические серусодержащие соединения | | | |
| Диметилсульфоксид | OS(CH3)2 | 5,13 ± 0,15 | 718 ± 7 |
| Азотсодержащие соединения | | | |
| 2-Этилпиридин  3-Этилпиридин  4-Этилпиридин  2-Метил-5-этилпиридин  1,4-Диметилпиперазин  2,6-Диметилпиперазин  Капролактам | C7H9N  C7H9N  C7H9N  C8H11N  C6H14N2  C6H14N2  C6H11NO | 3,81 ± 0,11  4.19 ± 0,13  4,19 ± 0,13  3,25 ± 0,10  3,73 ± 0,11  3,80 ± 0,11  4,66 ± 0,14 | 628 ± 6  651 ± 7  653 ± 7  656 ± 7  606 ± 6  646 ± 6  801± 8 |

*Продолжение таблицы 1*

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Вещество | Химическая формула | | /МПа | /K |
| Ферроцен и его производные | | | | |
| Ферроцен  н-Бутилферроцен  1-Ацетилферроцен  Бензоилферроцен | | C10H10Fe  C14H18Fe  C12H12FeO  C17H14FeO | 3,61 ± 0,10  2,18 ± 0,09  3,28 ± 0,13  1,59 ± 0,06 | 785 ± 8  784 ± 12  847 ± 13  886 ± 13 |
| Тетраалкоксититаны и тетраалкоксисиланы | | | | |
| Тетраизопропоксититан  Тетра-терт-бутоксититан  Тетраизопропоксисилан | | Ti[OCH(CH3)2]4  Ti[OC(CH3)3]4  Si[OCH(CH3)2]4 | 1,15 ± 0,04  1,07 ± 0,03  1,31 ± 0,04 | 641 ± 6  657 ± 7  587 ± 6 |

**3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

С помощью методики ГСССД МЭ 163-2010 измерены критическая температура и критическое давление 99 веществ, принадлежащих к различным классам химических соединений. Измерения выполнены на высокочистых образцах, приобретенных у фирм Sigma, Aldrich, Fluka, Alfa Aesar, ABCR, Acros Organics и синтезированных в Институте органического синтеза УрО РАН. Большинство исследованных соединений являются термически нестабильными, т.е. их разложение начинается при температурах ниже критической температуры. Для подавляющего числа веществ измерения критических свойств выполнены впервые и остаются единственными, т.к. критические константы этих соединений не могут быть измерены другими методами, развитыми к настоящему времени.

Приведены стандартные справочные данные о критической температуре и критическом давлении 99 индивидуальных веществ. При разработке стандартных справочных данных учитывались все имеющиеся в литературе результаты измерений критических свойств этих веществ.

Разработанные стандартные справочные данные о критической температуре и критическом давлении органических и элементорганических соединений найдут широкое применение в различных областях науки и техники, в первую очередь, в химической и нефтехимической промышленности, фармацевтике.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Daubert T. E. Strengths and Weakness of Predictive Methods for Estimating Thermophysical Properties. *J Chem. Eng. Data*, 1996, *41*, 942-946.
2. de la Tour. *Ann. Chim. Phys*. 1882, *21*, 127-132.
3. Ambrose D., Young C. L. Vapor-Liquid Critical Properties of Elements and Compounds. 1. An Introductory Survey. *J. Chem. Eng. Data*, 1995, *40,* 345-357.
4. Ambrose D., Tsonopoulos C. Vapor-Liquid Critical Properties of Elements and Compounds. 2. Normal Alkanes. *J. Chem. Eng. Data*, 1995, *40,* 531-546.
5. Tsonopoulos C., Ambrose D. Vapor-Liquid Critical Properties of Elements and Compounds. 3. Aromatic Hydrocarbons. *J. Chem. Eng. Data*, 1995, *40,* 547-558.
6. Gude M., Teja A. S. Vapor-Liquid Critical Properties of Elements and Compounds. 4. Aliphatic Alkanols. *J. Chem. Eng. Data*, 1995, *40,* 1025-1036.
7. Daubert T. E. Vapor-Liquid Critical Properties of Elements and Compounds. 5. Branches Alkanes and Cycloalkanes. *J. Chem. Eng. Data*, 1996, *41,* 365-372.
8. Tsonopoulos C., Ambrose D. Vapor-Liquid Critical Properties of Elements and Compounds. 6. Unsaturated Aliphatic Hydrocarbons. *J. Chem. Eng. Data*, 1996, *41,* 645-656.
9. Kudchadker A. P., Ambrose D., Tsonopoulos C. Vapor-Liquid Critical Properties of Elements and Compounds. 7. Oxygen Compounds Other Than Alkanols and Cycloalkanols. *J. Chem. Eng. Data*, 2001, *46,* 457-479.
10. Tsonopoulos C., Ambrose D. Vapor-Liquid Critical Properties of Elements and Compounds. 8. Organic Sulfur, Silicon, and Tin Compounds (C + H + S, Si, and Sn). *J. Chem. Eng. Data*, 2001, *46,* 480-485.
11. Marsh K. N., Young C. L., Morton D. W., Ambrose D., Tsonopoulos C. Vapor-Liquid Critical Properties of Elements and Compounds. 9. Organic Compounds Containing Nitrogen. *J. Chem. Eng. Data*, 2006, *51,* 305-314.
12. Marsh K. N., Abramson A., Ambrose D., Morton D. W., Nikitin E., Tsonopoulos C., Young C. L. Vapor-Liquid Critical Properties of Elements and Compounds. 10. Organic Compounds Containing Halogens. *J. Chem. Eng. Data,* 2007, *52*, 1509-1538.
13. Ambrose D., Tsonopoulos C., Nikitin E. D. Vapor-Liquid Critical Properties of Elements and Compounds. 11. Organic Compounds Containing B + O; Halogens + N, + O, + O + S, + S, + Si; N + O; and O + S, + Si. *J. Chem. Eng. Data,* 2009, *54*, 669-689.
14. Ambrose D., Tsonopoulos C., Nikitin E. D., Morton D. W., Marsh K. N. Vapor−Liquid Critical Properties of Elements and Compounds. 12. Review of Recent Data for Hydrocarbons and Non-hydrocarbons. *J. Chem. Eng. Data,* 2015, *60*, 3444-3482.
15. Методика ГСССД МЭ 163-2010. Методика экспериментального определения критической температуры и критического давления индивидуальных веществ / Е. Д. Никитин, П. А. Павлов. Росс. научно-техн. центр информации по стандартизации, метрологии и оценке соответствия. М., 2010 – 31 с. Илл. 8. Библиогр. 29 назв. Рус. 12 назв. Деп. в ФГУП «Стандартинформ» 16.06.2010 г., № 865а-2010кк.
16. Таблицы стандартных справочных данных ГСССД 268-2012. Критические температуры и критические давления индивидуальных веществ / Е. Д. Никитин, П. А. Павлов, А. П. Попов. Росс. научно-техн. центр информации по стандартизации, метрологии и оценке соответствия. М., 2012 – 27 с. Библиогр. 58 назв. Рус. 3 назв. Деп. в ФГУП «Стандартинформ» 05.07.2012 г., № 873-2012кк.
17. Nikitin E. D., Pavlov P. A., Bessonova N. V. Critical Constants of n-Alkanes with from 17 to 24 Carbon Atoms. *J. Chem. Thermodyn*., 1994, *26*, 177-182.
18. Nikitin E. D., Pavlov P. A., Popov A. P. Vapour-Liquid Critical Temperatures and Pressures of Normal Alkanes with from 19 to 36 Carbon Atoms, Naphthalene and m-Terphenyl Determined by the Pulse-Heating Technique. *Fluid Phase Equilib*., 1997, *141*, 155-164.
19. Nikitin E. D., Popov A. P. Critical Temperatures and Pressures of C40, C44, and C60 Normal Alkanes Measured by the Pulse-Heating Technique. *Fluid Phase Equilib*. 2014, *379*, 191–195.
20. Nikitin E. D., Popov A. P., Bogatishcheva N. S. Critical Point Measurements for Five *n*-Alkylcyclohexanes (C6 to C10) by the Pulse-Heating Method. *J. Chem. Eng. Data*, 2003, *48*, 1137-1140.
21. Morton D. W., Lui M. P. W., Tran C. A., Young C. L.Gas-Liquid Critical Temperatures of Some Alkenes, Amines, and Cyclic Hydrocarbons. *J. Chem. Eng. Data,* 2004,*49,* 283-285.
22. Ihmels C., Wollmann R., Laue S., Hieronimus N. DIPPR Project 851: Final Report for 2007, Oct. 2008.
23. Ambrose D. Critical temperatures of some phenols and other organic compounds. *Trans. Faraday Soc.* 1963, *59*, 1988-1993.
24. Nikitin E. D., Popov A. P., Bogatishcheva N. S. Critical Properties of Some Alkylnaphthalenes. *Fluid Phase Equilib*. 2013, *358*, 296–300.
25. Wilson G. M., Johnston R. H., Hwang S.-C., Tsonopoulos C. Volatility of Coal Liquids at High Temperatures and Pressures. *Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev*. 1981, *20*, 94–104.
26. Nikitin E. D., Popov A. P. Critical Point Measurement of Some Polycyclic Aromatic Hydrocarbons. *J. Chem. Thermodyn*. 2015, *80*, 124–127.

27. Nikitin E. D., Popov A. P., Bogatishcheva N. S., Kuznetsov V. A. Critical Temperatures and Pressures of Straight-Chain Alkanediols (C3 to C12). *Fluid Phase Equilib*. 2013, *355*, 40–45.

28. Nikitin E. D., Popov A. P. Vapor–Liquid Critical Point Measurements of Fifteen Compounds by the Pulse-Heating Method. *Fluid Phase Equilib*. 2014, *380*, 11–17.

29. Wilson L. C., Wilson H. L., Wilding W. V., Wilson G. M. Critical Point Measurements for Fourteen Compounds by a Static Method and a Flow Method. *J. Chem. Eng. Data,* 1996, *41*, 1252-1254.

30. VonNiederhausern D.M., Wilson L. C., Giles N. F., Wilson G. M. Critical-Point Measurements for Nine Compounds by a Flow Method *J. Chem. Eng. Data*. 2000, *45*, 154−156.

31. Wilson G. M., VonNiederhausern D. M., Giles N. F. Critical Point and Vapor Pressure Measurements for Nine Compounds by a Low Residence Time Flow Method. *J. Chem. Eng. Data*. 2002, *47*, 761−764.

32. VonNiederhausern D. M., Wilson G. M., Giles N. F. Critical Point and Vapor Pressure Measurements for Four Compounds by a Low Residence Time Flow Method. *J. Chem. Eng. Data*. 2006, *51*, 1986−1989.

33. Nikitin E. D., Pavlov P. A., Skripov P. V. Measurement of the Critical Properties of Thermally Unstable Substances and Mixtures by the Pulse-Heating Method. *J. Chem. Thermodyn.*, 1993, *25*, 869-880.

34. Nikitin E. D., Pavlov P. A., Popov A. P. (Gas + Liquid) Critical Temperatures and Pressures of Polyethene Glycols from  to . *J. Chem. Thermodyn.*, 1995, *27*, 43-51.

35. Nikitin E. D., Popov A. P. Critical Temperatures and Pressures of Ethylene Glycols. *Fluid Phase Equilib*. 2018, *472*, 56–61.

36. Lyons R. L., M.S. Thesis, Pennsylvania State University, 1985; цитируется по работе: Kudchadker A. P., Ambrose D., Tsonopoulos C. Vapor-Liquid Critical Properties of Elements and Compounds. 7. Oxygen Compounds Other Than Alkanols and Cycloalkanols. *J. Chem. Eng. Data*. 2001, *46*, 457–479.

37. Teja A. S., Anselme M. J. The Critical Properties of Thermally Stable and Unstable Fluids. I. 1985 Results. *AIChE Symp. Ser*. 1990, *86 (279)*, 115–121.

38. Teja A. S., Rosenthal D. J. The Critical Pressures and Temperatures of Ten Substances Using a Low Residence Time Flow Apparatus. *DIPPR Data Ser*. 1991, *1*, 96–100.

39. Anselme M. J., Teja A. S. The Critical Properties of Rapidly Reacting Substances. *AIChE Symp. Ser*. 1990, *86 (279)*, 128–132.

40. Steele W. V., Chirico R. D., Cowell A. B., Knipmeyer S. E., Nguyen A. Thermodynamic Properties and Ideal-Gas Enthalpies of Formation for Methyl Benzoate, Ethyl Benzoate, (*R*)-(+)-Limonene, *tert-A*myl Methyl Ether, *trans*-Crotonaldehyde, and Diethylene Glycol. *J. Chem. Eng. Data,* 2002, *47*, 667-688.

41. Steele W. V., Chirico R. D., Knipmeyer S. E., Nguyen A. Measurements of Vapor Pressure, Heat Capacity, and Density along the Saturation Line for ε-Caprolactam, Pyrazine, 1,2-Propanediol, Triethylene Glycol, Phenyl Acetylene, and Diphenyl Acetylene. *J. Chem. Eng. Data*. 2002, *47*, 689–699.

42. Ambrose D., Ellender J. H., Gunry H. A., Lee D. A., Townsend R. Thermodynamic Properties of Organic Oxygen Compounds LI. The Vapour Pressures of Some Esters and Fatty Acids. *J. Chem. Thermodyn*. 1981, *13*, 795–802.

43. Ma P, Wang J, Ruan Y. Determination of Critical Parameters of Seven Organic Compounds. *Gaoxiao Huaxue Gongcheng Xuebao.* 1995, *9*, 62–66.

44. Morton D. W., Lui M., Young C. L. The (Gas + Liquid) Critical Temperature of Some Ethers, Esters, and Ketones. *J. Chem. Thermodyn*. 1999, *31*, 675–684.

45. Nikitin E. D., Popov A. P. Vapour–Liquid Critical Properties of Components of Biodiesel. 1. Methyl Esters of n-Alkanoic Acids. *Fuel*. 2015, *153*, 634–639.

46. Nikitin E. D., Popov A. P. Vapour–Liquid Critical Properties of Components of Biodiesel. 3. Methyl Esters of Linoleic, Linolenic, and Erucic Acids. *Fuel*. 2016, *176*, 130–134.

47. Nikitin E. D., Popov A. P. Vapor–Liquid Critical Properties of Components of Biodiesel. 2. Ethyl Esters of n-Alkanoic Acids. *Fuel*. 2016, *166*, 502–508.

48. Radice G. Thesis, University of Geneva, 1899; from Guye P.-A., Mallet E. *Arch. Sci. Phys. Nat*. 1902, *13*, 30–40.

49. Steele W. V., Chirico R. D., Hossenlopp I. A., Knipmeyer S. E., Nguyen A, Smith N.K. DIPPR Project 871 Determination of Ideal Gas Enthalpies of Formation for Key Compounds: the 1990 Project Results. Experimental Results for DIPPR 1990-1991 Projects on Phase Equilibria and Pure Component Properties. *DIPPR Data Ser*. 1994, *2*, 188–215.

50. VonNiederhausern D. M., Wilson G. M., Giles N. F. Critical Point and Vapor Pressure Measurements for 17 Compounds by a Low Residence Time Flow Method *J. Chem. Eng. Data*. 2006, *51*, 1990–1995.

51. Nikitin E., Popov A., Bogatishcheva N., Krasnykh E., in: The 18th IUPAC International Conference on Chemical Thermodynamics and the 12th National Conference on Chemical Thermodynamics and Thermal Analysis. Book of Abstracts. Beijing, China, August 17–21, 2004, p. 177.

52. Nikitin E. D., Popov A. P. Critical Temperatures and Pressures of Some Dicarboxylic Acid Diethyl Esters. *Fluid Phase Equilib*. 2016, *412*, 57–61.

53. Nikitin E. D., Popov A. P. Vapor-Liquid Critical Temperatures and Pressures of Dicarboxylic Acid Diethyl Esters. *J. Chem. Thermodyn*. 2018, *116*, 130–133.

54. Polikhronidi N. G., Abdulagatov I. M., Batyrova R. G., Stepanov G. V., Ustuzhanin E. E., Wu J. T. Experimental Study of the Thermodynamic Properties of Diethyl Ether (DEE) at Saturation. *Int. J. Thermophys.* 2011, *32*, 559–595.

55. Ambrose D., Broderick B. E., Townsend R. The Critical Temperatures and Pressures of Thirty Organic Compounds. *J. Appl. Chem. Biotechnol*. 1974, 24, 359–372.

56. Liang Y., Ma P., Zhang H. *J.* *Chem. Ind. Eng*. (China). 2000, *51*, 243–247.

57. Toczylkin L. S., Young C. L. Gas-Liquid Critical Temperatures of Mixtures Containing Electron Donors I. Ether Mixtures. *J. Chem. Thermodyn*. 1980, *12*, 355–364.

58. Nikitin E. D., Popov A. P., Bogatishcheva N. S. Critical Properties of Some Aliphatic Symmetrical Ethers. *J. Chem. Thermodyn*. 2014, *68*, 288–292.

59. Morad N. A., Idress M., Hasan A. A. Improved Conditions for Measurement of the Specific Heat Capacities of Pure Triglycerides by Differential Scanning Calorimetry. *J. Thermal. Anal*. 1995, *44*, 823–835.

60. Bogatishcheva N. S., Faizullin M. Z., Popov A. P., Nikitin E. D. Critical Properties, Heat Capacities, and Thermal Diffusivities of Four Saturated Triglycerides. *J. Chem. Thermodyn*. 2017, *113*, 308–314.

61. Ambrose D., Ghiassee N. B. Vapour Pressures, Critical Temperatures, and Critical Pressures of Benzyl Alcohol, Octan-2-ol, and 2-Ethylhexan-1-ol. *J. Chem. Thermodyn.,* 1990, *22*, 307-311.

62. Nikitin E. D., Popov A. P. Critical temperatures and pressures of caprolactam, dimethyl sulfoxide, 1,4-dimethylpiperazine, and 2,6-dimethylpiperazine. *Fluid Phase Equilib*. 2018, *473*, 32–36.

63. Lam T. T., Vickery T., Tuma L. Thermal Hazards and Safe Scale-up of Reactions Containing Dimethyl Sulfoxide. *J. Therm. Anal. Calorim*. 2006, *85*, 25–30.

64. Yang X.-W., Zhang X.-Y., Guo Z.-Ch., Bai W.-Sh., Hao L., Wei H.-Y. Effects of incompatible substances on the thermal stability of dimethyl sulfoxide. *Thermochim. Acta*. 2013, *559*, 76–81.

65. Ambrose D., Grant D. G. The Critical Temperatures of Some Hydrocarbons and Pyridine Bases. *Trans. Faraday Soc*. 1957, *53*, 771–778.

66. Nikitin E. D., Popov A. P. Critical point measurements of four pyridines. *Fluid Phase Equilib*. 2017, *446*, 14–17.

67. Steele W. V., Chirico R. D., Knipmeyer S. E, Nguyen A., Smith N. K. Thermodynamic Properties and Ideal-Gas Enthalpies of Formation for Dicyclohexyl Sulfide, Diethylenetriamine, Di-*n*-octyl Sulfide, Dimethyl Carbonate, Piperazine, Hexachloroprop-1-ene, Tetrakis(dimethylamino)ethylene, *N*,*N*’-Bis-(2-hydroxyethyl)ethylenediamine, and 1,2,4-Triazolo[1,5-*a*]pyrimidine. *J. Chem. Eng. Data*. 1997, *42*, 1037–1052.

68. Nikitin E. D., Popov A. P. Critical Point Measurement of Ferrocene and Some of its Derivatives. *Fluid Phase Equilib*. 2012, *324*, 13–16.

69. Nikitin E. D., Popov A. P., Simakina V. A. Vapor-Liquid Critical Properties of Some Tetraalkoxysilanes. *J. Chem. Eng. Data*, 2008, *53*, 1371-1374.

70. Nikitin E. D., Popov A. P., Yatluk Y. G., Simakina V. A. Critical Temperatures and Pressures of Tetraalkoxytitaniums. *J. Chem. Eng. Data*, 2010, *55*, 178-183.

71. Nikitin E. D., Popov A. P., Yatluk Yu. G., Simakina V. A. Critical properties of some tetraalkoxysilanes and tetraalkoxytitaniums with branched alkyl radicals. *Fluid Phase Equilib*. 2012, *331*, 1–5.

**5.** **ПРИЛОЖЕНИЕ**

Таблица 2 – Чистота исследованных образцов веществ в соответствии с сертификатами производителя

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Вещество | Производитель | Метод анализа | Чистота (мол. %) |
| *н*-Нонадекан  *н*-Эйкозан  *н*-Генэйкозан  *н*-Докозан  *н*-Трикозан  *н*-Тетракозан  *н*-Гексакозан  *н*-Октакозан  *н*-Триаконтан  *н*-Гексатриаконтан  *н*-Тетраконтан  *н*-Тетратетраконтан  *н*-Гексаконтан  Циклогексан  Метилциклогексан  Этилциклогексан  Пропилциклогексан  Бутилциклогексан  1-Метилнафталин  2-Метилнафталин  1,3-Диметилнафталин | Sigma-Aldrich  Sigma-Aldrich  Sigma-Aldrich  Sigma-Aldrich  Sigma-Aldrich  Sigma-Aldrich  Sigma-Aldrich  Sigma-Aldrich  Sigma-Aldrich  Sigma-Aldrich  Fluka  Aldrich  Aldrich  Fluka  Aldrich  Fluka  Aldrich  Aldrich  Alfa Aesar  Alfa Aesar  Aldrich | ГХ1  ГХ  ГХ  ГХ  ГХ  ГХ  ГХ  ГХ  ГХ  ГХ  ГХ  ГХ  ГХ  ГХ  ГХ  ГХ  ГХ  ГХ  ГХ  ГХ  ГХ | 99,9  99,9  99,9  99,9  99,9  99,9  99,9  99,8  99,9  99,9  98,7  98,9  98,4  99,5  99,6  99,5  99,7  99,6  99,2  99,5  99,6 |

*Продолжение таблицы 2*

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Вещество | Производитель | Метод анализа | Чистота (мол. %) |
| 1,4-Диметилнафталин  2-Этилнафталин  Аценафтен  Флуорен  Антрацен  Фенантрен  Пирен  1,3-Пропандиол  1,4-Бутандиол  1,5-Пентандиол  1,6-Гександиол  1,8-Октандиол  1,9-Ноналдиол  1,10-Декандиол  1,12-Додекандиол  2,2-Диметил-1,3-пропандиол  Моноэтиленгликоль  Диэтиленгликоль  Триэтиленгликоль  Тетраэтиленгликоль  Пентаэтиленгликоль  Гексаэтиленгликоль  Метил гексаноат | Aldrich  Aldrich  Alfa Aesar  Alfa Aesar  Alfa Aesar  Alfa Aesar  Alfa Aesar  Aldrich  Alfa Aesar  Alfa Aesar  Aldrich  Alfa Aesar  Aldrich  Aldrich  Aldrich  Aldrich  Sigma-Aldrich  Sigma-Aldrich  Sigma-Aldrich  Sigma-Aldrich  Sigma-Aldrich  Sigma-Aldrich  Alfa Aesar | ГХ  ГХ  ГХ  ГХ  ГХ  ГХ  ГХ  ГЖХ2  ГЖХ  ГЖХ  ГЖХ  ГЖХ  ГЖХ  ГЖХ  ГЖХ  ГХ  ГХ  ГХ  ГХ  ГХ  ГХ  ГХ  ГХ | 99,4  99,9  98,0  98,1  99,5  98,0  98,3  99.9  99,9  99,9  99,9  99,9  99,9  99,9  99,9  99,9  99,86  99,5  99,7  99,1  97,8  98,1  99,9 |

*Продолжение таблицы 2*

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Вещество | Производитель | Метод анализа | Чистота (мол. %) |
| Метил гептаноат  Метил октаноат  Метил нонаноат  Метил деканоат  Метил ундеканоат  Метил додеканоат  Метил тетрадеканоат  Метил гексадеканоат  Метил октадеканоат  Метил олеат  Метил линолеат  Метил линоленат  Метил эрукат  Этил деканоат  Этил ундеканоат  Этил додеканоат  Этил тетрадеканоат  Этил гексадеканоат  Диэтил пропандиоат  Диэтил бутандиоат  Диэтил пентандиоат  Диэтил гександиоат  Диэтил октандиоат | Sigma-Aldrich  Alfa Aesar  Sigma-Aldrich  Alfa Aesar  Alfa Aesar  Alfa Aesar  Alfa Aesar  Sigma  Alfa Aesar  Aldrich  Sigma-Aldrich  Sigma-Aldrich  Sigma-Aldrich  Alfa Aesar  Alfa Aesar  Alfa Aesar  Alfa Aesar  Alfa Aesar  Sigma-Aldrich  Sigma-Aldrich  Alfa Aesar  Sigma-Aldrich  Alfa Aesar | ГХ  ГХ  ГХ  ГХ  ГХ  ГХ  ГХ  ГХ  ГХ  ГХ  ГХ  ГХ  ГХ  ГХ  ГХ  ГХ  ГХ  ГХ  ГХ  ГХ  ГХ  ГХ  ГХ | 99,8  99,1  98,9  99,9  98,6  99,1  99,4  99,9  98,7  99,8  99,9  99,4  99,4  99,7  98,6  99,8  99,4  98,5  99,8  99,8  99,6  >99,9  99,5 |

*Продолжение таблицы 2*

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Вещество | Производитель | Метод анализа | Чистота (мол. %) |
| Диэтил декандиоат  Ди-н-гексиловый эфир  Ди-н-октиловый эфир  Ди-н-дециловый эфир  Глицерид триоктаноат  Глицерид тридеканоат  Глицерид тридодеканоат  Глицерид тритетрадеканоат  Фенилметанол  4-(Метилфенил)метанол  Бензойная кислота  2-Метилбензойная кислота  3-Метилбензойная кислота  4-Метилбензойная кислота  2-Карбоксибензальдегид  Бензальдегид  4-Метилбензальдегид  Диметилсульфоксид  2-Этилпиридин  3-Этилпиридин  4-Этилпиридин | Sigma-Aldrich  Alfa Aesar  Aldrich  Alfa Aesar  Alfa Aesar  Alfa Aesar  Alfa Aesar  Alfa Aesar  Fluka  Lancaster  Fluka  Aldrich  Aldrich  Fluka  Alfa Aesar  Aldrich  Lancaster  Sigma-Aldrich  Alfa Aesar  Alfa Aesar  Alfa Aesar | ГХ  ГХ  ГХ  ГХ  ГХ  ТСХ3  ГХ  ТСХ  ГХ  ТСХ  ГХ  ГХ  ГХ  ГХ  ГХ  ГХ  ГХ  ГХ  ГХ  ГХ  ГХ  ГХ  ГХ | 99,7  99,3  99,2  98,7  99  100  100  100  100  100  99,9  99,9  99,4  99,9  99,9  99,8  97,4  99,9  99,9  99,9  99,7  99,5  99,5 |

*Продолжение таблицы 2*

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Вещество | Производитель | Метод анализа | Чистота (мол. %) |
| 2-Метил-5-этилпиридин  1,4-Диметилпиперазин  2,6-Диметилпиперазин  Капролактам  Ферроцен  н-Бутилферроцен  1-Ацетилферроцен  Бензоилферроцен  Тетраизопропоксититан  Тетра-терт-бутоксититан  Тетраизопропоксисилан | Alfa Aesar  Sigma-Aldrich  Sigma-Aldrich  Sigma-Aldrich  Fluka  ABCR  ABCR  Acros Organics  ИОС4  ИОС  ИОС | ГХ  ГХ  ГХ  ГХ  ГХ  ГХ  ГХ  ГХ  ПМС5  ПМС  ПМС | 97,6  99,9  99,8  99,99  99,9  99,7  99,9  99,0  99,9  99,8  99,9 |

1 ГХ – газовая хроматография.

2 ГЖХ – газо-жидкостная хроматография.

3 ТСХ – тонкослойная хроматография

4 Синтез, очистка и анализ образцов были выполнены в Институте органического синтеза УрО РАН под руководством Ю.Г. Ятлука.