Бакулин В.Н.
Дубовкин Н.Ф.
Котова В.Н.
Сорокин В.А. и др.

Энергоемкие горючие для авиационных и ракетных двигателей



МОСКВА
ФИЗМАТЛИТ ®

УДК 621.43.019.2
ББК 31.352
Э65

Авторский коллектив:
Бакулин В.Н., Дубовкин Н.Ф., Котова В.Н., Сорокин В.А.,
Францкевич В.П., Яновский Л.С.

Энергоемкие горючие для авиационных и ракетных двигателей / Под ред. Л.С. Яновского. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. — 400 с. — ISBN 978-5-9221-1091-4.

В книге систематизированы и обобщены экспериментальные и расчетные данные по свойствам жидких, твердых и суспензионных энергоемких горючих и их компонентов.

Книга рассчитана на научных работников и инженеров, занимающихся разработкой горючих, а также проектированием, исследованиями и эксплуатацией авиационных и ракетных двигателей, энергетических установок и транспортных средств, и будет полезна студентам и аспирантам авиационных, энергетических и технологических специальностей технических вузов.

Табл. 591. Ил. 105. Библиогр. 501 назв.

The experimental and computational data of physical and chemical properties of liquid and solid high density fuels and their components are given.

The book is intended for scientists and engineers in fuel combustion, design, research and operation of aviation and rocket engines, power units and transport facilities.

The book will be useful for students and post-graduate students of technical universities.

Рецензенты:
член-корреспондент Российской академии наук, доктор химических наук, профессор У.М. Джемилев (Институт нефтехимии и катализа РАН);
кафедра «Ракетные двигатели» Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана (заведующий кафедрой — доктор технических наук, профессор Д.А. Ягодников)

ISBN 978-5-9221-1091-4

© ФИЗМАТЛИТ, 2009
© Коллектив авторов, 2009

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие 8
Основные термины и определения. 12
Условные обозначения и сокращения. 14

Глава 1. **Жидкие углеводородные горючие** 18
1.1. Горючее Т-1 18
1.2. Горючее нафтил 25
1.3. Горючее Т-6 31
1.4. Горючее JP-7. 44
1.5. Горючее JP-8. 45
1.6. Горючее JP-900 47
1.7. Горючее RJ-4. 48
1.8. Горючее RJ-5. 52
1.9. Горючее RJ-6. 56
1.10. Горючее JP-9. 60
1.11. Горючее JP-10 64
1.12. Горючее SI-80 69
1.13. Горючее Carene 71
1.14. Горючее EN 72
1.15. Горючее Carene+EN 73
1.16. Горючее боктан 75

Глава 2. **Жидкие борсодержащие горючие** 78
2.1. Изопропилметакарборан + толуол 81
2.2. Изопропилметакарборан + изопропилбензол. 81
2.3. Изопропилметакарборан + изобутилбензол 83
2.4. Изопропилметакарборан + нафтил 84
2.5. Изопропилметакарборан + циклин 85
2.6. Изопропилметакарборан + пенталан 87
2.7. Изопропилметакарборан + толуол + циклин 88
2.8. Изопропилметакарборан + Т-6. 89
2.9. Изопропилметакарборан + RJ-5 91

Глава 3. **Суспензионные тиксотропные горючие** 93
3.1. Горючее Т-6+углерод 99
3.2. Горючее Т-6+Al 99
3.3. Горючее Т-6+B 101
3.4. Горючее Т-6+AlB_2 101
3.5. Горючие на основе смесей Т-6, ИПМК, Al, AlB_2 и углерода 102

Глава 4. **Твердые легкоплавкие горючие** 104
4.1. Горючие на основе полиэтилена, углерода и металлов 107
4.2. Горючие на основе ДАМСТ, углерода и металлов 110
4.3. Горючие на основе антрацена, углерода и металлов 113
4.4. Горючие на основе декаборана, углерода и металлов 116

Глава 5. **Жидкие углеводородные компоненты энергоемких горючих** 120
5.1. Метилциклогексан 124
5.2. Толуол 138
5.3. Изопропилбензол 153
5.4. Изобутилбензол 157
5.5. Циклин 162
5.6. Пенталан 164
5.7. Децилин 165

Глава 6. **Борсодержащие компоненты энергоемких горючих** 167
6.1. Диборан 170
6.2. Пентаборан 177
6.3. Декаборан 180
6.4. Изопропилметакарборан 188

Глава 7. **Твердые углеводородные компоненты энергоемких горючих** 196
7.1. ДАМСТ 196
7.2. Антрацен 196
7.3. Полиэтилен 199

Глава 8. **Металлы и неметаллы – компоненты энергоемких горючих** 204
8.1. Литий 205
8.2. Бериллий 222
8.3. Бор 231
8.4. Алюминий 239
8.5. Бориды алюминия 246
8.6. Магний 253

8.7. Бориды магния 261
8.8. Цирконий 265
8.9. Гафний 270
8.10. Торий 276
8.11. Углерод 282
8.12. Фуллерен 289

Глава 9. **Гидриды металлов – компоненты энергоемких горючих** 301
9.1. Гидрид лития 303
9.2. Гидрид бериллия 309
9.3. Гидрид магния 311
9.4. Гидрид алюминия 313
9.5. Гидрид циркония 317
9.6. Гидриды фуллеренов 323
9.7. Комплексные гидриды металлов 326
Литература 335

Приложение А. Физико-химические методы определения состава продуктов сгорания металлизированных топлив 362
Приложение Б. Характеристики ракетных топлив при теоретически максимальном удельном импульсе 371
Приложение В. Характеристики топлив с добавками свободных радикалов и ионов 381
Приложение Г. Теплоты образования н-парафиновых углеводородов и компонентов продуктов сгорания, образованных металлами и неметаллами 386

Предисловие

Со второй половины XX столетия по настоящее время в нашей стране и за рубежом (в США, Англии, Франции и др.) проводятся исследования по беспилотным летательным аппаратам (БПЛА), которые в конце прошлого века перешли в стадию создания опытных образцов БПЛА различного целевого назначения. Особенно успешно шли работы по БПЛА авиационного базирования: "воздух–воздух", "воздух–земля", "воздух–море". Разработка и ввод в эксплуатацию БПЛА в настоящее время рассматривается как важнейшее направление в области стратегических и тактических систем оружия на ближайшие 20–30 лет. Для того, чтобы БПЛА авиационного базирования имели необходимые летно-технические характеристики (ЛТХ), они должны удовлетворять жестким габаритно-массовым ограничениям.

Ракеты с атмосферной зоной эксплуатации, как правило, имеют ограниченный объем, при этом бак с горючим занимает малую часть ракеты. Поэтому основным требованием, предъявляемым к ракетным горючим, является повышенная теплота сгорания на единицу объема (энергоемкость).

В некоторых случаях выбор горючего ограничивается такими свойствами, как вязкость, испаряемость или чувствительность к детонации. При благоприятном сочетании указанных свойств последние позволяют упростить обслуживание и эксплуатацию силовой установки изделия, и, тем самым, сделать горючее весьма привлекательным, даже если энергоемкость не очень велика. Так, например, создание новых горючих, обладающих более высокой энергоемкостью по сравнению с существующими, и, в то же время, достаточно удобных в эксплуатации, во многих ведущих странах относится к приоритетным направлениям научно-исследовательских работ.

В связи с этим в нашей стране и за рубежом, начиная с 70-х годов, проводятся исследования по энергоемким горючим. Благодаря разработке жидких синтетических углеводородных горючих удалось создать крылатые ракеты с дальностью полета более чем на 20% выше по сравнению с дальностью, достижимой при использовании обычных реактивных топлив.

В настоящее время сохраняется необходимость проведения исследований широкого спектра новых энергоемких горючих. При этом желательно иметь в виду возможность применения их в объектах разного целевого назначения. Среди таких горючих могут быть энергоносители в жидком, твердом и суспензионном состояниях.

В нашей стране были развернуты поисковые исследования новых высокоплотных углеводородных соединений, используя которые можно было бы создать отечественные горючие, не уступающие по энергетическим и эксплуатационным показателям зарубежным энергоемким горючим.

Для этой цели в ЦИАМ были разработаны технические требования к энергоемким горючим, определены области поиска и привлечены институты химического и технологического профиля для синтеза высокоплотных углеводородных соединений и промышленного производства (на их основе) энергоемких горючих. Одновременно, чтобы не задерживать доводку разрабатываемых БПЛА, в ЦИАМ был выполнен анализ физико-химических и эксплуатационных свойств штатных горючих. Требовалось найти горючее, на котором можно было бы выполнять доводку и летные испытания БПЛА. При этом переход на разрабатываемое синтетическое горючее с лучшими энергетическими показателями не должен был требовать дополнительной доводки материальной части.

В результате сравнения авиационных горючих между собой с учетом требований, обусловленных условиями эксплуатации БПЛА и его силовой установки, было рекомендовано: доводку двигателя и летные испытания БПЛА проводить на реактивном горючем Т-6. Эта рекомендация в дальнейшем полностью оправдалась, что позволило существенно сократить сроки доводки БПЛА различного класса.

Впервые был синтезирован ряд высокоплотных полициклических углеводородов с уникальными энергетическими и реологическими свойствами, и на их основе созданы отечественные энергоемкие горючие для БПЛА, некоторые из которых нашли практическое применение.

В настоящее время для БПЛА с ВРД разработано несколько синтетических углеводородных горючих. В частности, в России, кроме горючего Т-6, созданы горючие децилин, бицилин, бицилин-М, бицилин-С, бицилин-7 и др., в США – RJ-4, JP-9, JP-10, SI-80 и др. Отечественные горючие по объемной теплоте сгорания не уступают аналогичным горючим США.

Развитие БПЛА продолжается: улучшаются габаритно-массовые и летно-технические характеристики. Это достигается конструктивным совершенствованием летательных аппаратов, повышением надежности и экономичности двигателей и применением новых энергоемких горючих с улучшенными эксплуатационными показателями.

В ЦИАМ разработана методология, которая позволяет оценивать потенциальные возможности горючих и топлив любого агрегатного состояния и компонентного состава применительно к БПЛА разного целевого назначения. Одновременно с анализом характеристик всей системы “топливо–двигатель–аппарат” в ЦИАМ проводилась и ведется в настоящее время разработка и совершенствование комплексных программ расчета характеристик реальных объектов. Это позволяет ЦИАМ в тесном сотрудничестве с ОКБ-разработчиками БПЛА и си-

ловых установок, а также академическими и отраслевыми институтами успешно продвигаться в области синтеза новых компонентов для ракетных горючих и топлив и разработки технологических регламентов их промышленного производства.

Разработчики БПЛА по-прежнему нуждаются в информации по энергоемким горючим. Первое справочное издание по энергоносителям было опубликовано в 1997 г. За прошедшие годы номенклатура потенциально возможных компонентов энергоемких горючих для БПЛА значительно пополнилась, а область применения БПЛА расширилась.

Информация о свойствах энергоемких горючих и их компонентов содержится в различных научно-технических изданиях. Эта информация не систематизирована и часто не согласуется между собой. В то же время разработчикам энергоемких горючих и силовых установок БПЛА такая информация требуется при решении инженерных задач. Это обстоятельство сделало актуальным издание нового справочника, содержащего сведения о свойствах энергоемких горючих и их компонентов. При этом было необходимо учитывать принципиальные возможности использования отдельных энергоносителей в горючих для двигателей с разной организацией рабочего процесса (ГТД, ПВРД, ЖРД и др.).

Данные по плотности, вязкости, температурам начала кристаллизации и кипения, давлению насыщенных паров и теплоте сгорания получены, как правило, экспериментально, часть сведений взята из нормативных документов (технических условий, инструкций, руководств по эксплуатации и т.п.). Частично информация была получена расчетным путем, в предположении, что многокомпонентные горючие представляют собой физические смеси. В публикациях часто отсутствуют указания о погрешностях и областях применимости расчетных уравнений. В таких случаях авторы настоящего справочника опирались на данные по свойствам продуктов-аналогов. В ряде случаев при табулировании значений теплофизических свойств по температуре применялся графический метод.

В настоящем издании обобщены и систематизированы экспериментальные и расчетные данные по свойствам энергоемких энергоносителей и компонентов горючих, разработанных в ЦИАМ, ВНИИНП, БНЦ Уральского отделения РАН, ВНИИОС, ИНК РАН, ГИПХ, 25 ГосНИИ МО РФ, ГНИИХТЭОС и др.

Книга состоит из девяти глав.

В Главе 1 приведены данные о физических, теплотехнических и эксплуатационных свойствах жидких углеводородных горючих, разработанных в нашей стране и США в 80-х гг. Эти горючие в той или иной мере нашли практическое применение в газотурбинных двигателях БПЛА.

В Главе 2 рассмотрены потенциально возможные жидкие двухкомпонентные борсодержащие горючие.

В Главе 3 содержатся данные о свойствах суспензионных горючих на основе горючего Т-6 в смеси с техническим углеродом (ТУ), бором, алюминием и боридом алюминия.

В Главе 4 обобщены данные по твердым бинарным горючим. Они состоят из легкоплавкого углеводородного компонента и тугоплавкого энергоносителя (ТУ, С, Al, AlB_2 и В).

В Главе 5 содержатся сведения о свойствах углеводородных, в том числе синтетических, энергоносителей.

В Главе 6 приведены энергетические, физические, теплотехнические характеристики борсодержащих гидридов.

В Главе 7 дана общая характеристика полимерных энергоносителей.

В Главах 8 и 9 обобщены сведения о свойствах металлов, неметаллов и гидридов металлов – возможных эффективных компонентов многокомпонентных горючих.

При отборе информационных материалов для настоящего издания авторы сочли возможным не включать информацию по некоторым широко известным группам горючих, например, водородным, гидразинным, аминным и др., т.к. весьма содержательная информация по этим группам горючих имеется в книге «Химмотология ракетных и реактивных топлив» под ред. А.А. Браткова (М.: Химия, 1987, 304 с.), а также в новом справочнике "Газовые топлива и их компоненты. Свойства, получение, применение, экология" / Под ред. академика РАН О.Н. Фаворского – М.: Изд. дом МЭИ, 2008, 604 с. (авторы: В.Н. Бакулин, Е.М. Брещенко, Н.Ф. Дубовкин, О.Н. Фаворский).

В разработку энергоемких горючих для БПЛА большой вклад внесли научные сотрудники отдела "Двигатели и химмотология" ЦИАМ и МКБ "Искра". В книге использованы экспериментальные и расчетные данные, в получении которых непосредственное участие принимали к.т.н. Массур Ю.П., к.т.н. Федоров Е.П., Лещинский Д.Л., к.ф.-м.н. Мартыненко С.И., Смирнова Л.Н., Сапожкова Е.Ф., Теплова З.И., Мягкова Н.В., Власова Т.М. и другие.

Авторы выражают глубокую благодарность академику РАН Олегу Николаевичу Фаворскому за активное участие в постановке задач и обсуждении результатов исследований по данному направлению.

Авторы признательны рецензентам: сотрудникам кафедры "Ракетные двигатели" Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана (заведующий кафедрой – доктор технических наук, профессор Д.А. Ягодников) и члену-корреспонденту Российской Академии наук, доктору химических наук, профессору У.М.Джемилеву (Институт нефтехимии и катализа РАН) за ряд ценных замечаний и советов.

Авторы благодарны ведущему инженеру Л.Н. Смирновой за большой весьма квалифицированный труд по подготовке рукописи книги к изданию.

Основные термины и определения

Теплота сгорания, Q – количество теплоты, выделяющееся при полном сгорании топлива, отнесенное к единице массы топлива.

Различают высшую теплоту сгорания Q_V, которая включает теплоту конденсации водяных паров, образующихся в процессе сгорания топлива, и низшую теплоту сгорания Q_H, при определении которой теплота, выделяющаяся при конденсации водяных паров, считается потерянной и поэтому не учитывается. Q_H меньше Q_B на величину теплоты парообразования воды и разницы энтальпий пара и воды при 298,15 К. У топлив, не содержащих водорода, а следовательно, и воды в продуктах сгорания, $Q_B = Q_H$.

Теплота сгорания может быть определена экспериментально в калориметрической бомбе, либо расчетом по известным теплотам образования исходных веществ, входящих в состав топлива, и их продуктов сгорания, находящихся в соответствующем фазовом состоянии при температуре 298,15 К.

Энергоемкость, или объемная теплота сгорания, Q_V – количество теплоты, выделяющееся при полном сгорании топлива, отнесенное к единице объема топлива.

Теплопроизводительность, $H_{тп}$ – тепловыделение на 1 кг стехиометрической смеси горючего с воздухом, определяющее максимальную температуру продуктов сгорания.

Стехиометрический коэффициент, L_o – отношение массы окислителя, необходимой для полного сгорания горючего, к массе этого горючего. Используют также стехиометрический коэффициент, выраженный через мольные (L_m) или объемные (L_v) единицы измерения.

Коэффициент избытка окислителя, α – избыток окислителя по отношению к массе его в стехиометрической смеси.

Жаропроизводительность, $t_ж$ – максимальная температура продуктов сгорания при полном сгорании стехиометрической топливовоздушной смеси.

Энтальпия, H – функция состояния термодинамической системы, равная сумме внутренней энергии и произведения объема на давление. Энтальпия относится к термодинамическим функциям, изменение которых не зависит от пути процесса, а определяется начальным и конечным состояниями системы. Значения энтальпии веществ отсчитывают от ее значения при 0 К или 298 К и $1{,}01 \cdot 10^5$ Па.

Хладоресурс, $\Delta H_{х.р.}$ – теплопоглощение при нагреве от температуры горючего в баке до предельной температуры, характеризующей

охладительные возможности горючего (характеризует потенциальные возможности горючего поглощать тепло при использовании его в качестве охлаждающей среды в теплообменных устройствах).

Теплоемкость – отношение количества теплоты, сообщаемой горючему в процессе, к изменению его температуры. Различают изобарную (C_p) и изохорную (C_v) теплоемкости.

Показатель адиабаты, k – отношение изобарной теплоемкости к изохорной.

Термоокислительная стабильность – стойкость горючего к окислению в заданном эксплуатационном диапазоне температур, которому, в первую очередь, подвержены непредельные углеводороды. Термоокислительную стабильность определяют в статических и динамических условиях по массе образующихся осадков и смол. В статических условиях предусматривается нагрев горючего в бомбах в контакте с воздухом, в динамических – при движении топлива через нагреваемые трубку и контрольный фильтр.

Теплота образования – изобарный тепловой эффект химической реакции образования данного химического соединения из простейших веществ, отнесенный к одному молю или к одному килограмму этого соединения.

Стандартная теплота образования, $\Delta H^{\circ}_{f298,15}$ – теплота образования при условии, что как рассматриваемое сложное вещество, так и простые вещества находятся в стандартных состояниях.

Давление насыщенного пара, $p_{н.п.}$ – давление пара, находящегося в равновесии с соответствующей жидкой или твердой фазой.

Парциальное давление, p_i – давление, которое имел бы газ, находящийся в газовой смеси, если бы он один занимал объем, равный объему смеси при той же температуре.

Газовая постоянная, R_0 – характерная для каждого газа постоянная, входящая в уравнение состояния для одного килограмма идеального газа, численно равная отношению универсальной газовой постоянной к массе моля данного газа.

Диффузия – распространение горючего в какой-либо среде, обусловленное хаотическим тепловым движением молекул при наличии градиента концентрации.

Изобарный коэффициент термического расширения, α_t, характеризует изменение объема горючего при нагревании при постоянном давлении.

Коэффициент изотермической сжимаемости, $\beta_{из.}$, характеризует изменение объема горючего от давления при постоянной температуре.

Нормальная скорость распространения пламени, $u_н$ – это линейная скорость перемещения зоны горения по отношению к свежей гомогенной горючей смеси в направлении нормали к фронту пламени.

Условные обозначения и сокращения

a – скорость звука, м/с

C – концентрация вещества, % (об.)

$C_{\text{В}}$ – концентрация вещества на верхнем пределе распространения пламени, % (об.)

$C_{\text{Н}}$ – концентрация вещества на нижнем пределе распространения пламени, % (об.)

C_p – изобарная теплоемкость, кДж/(кг·К)

C_v – изохорная теплоемкость, кДж/(кг·К)

$C_{\text{стех.}}$ – концентрация горючего в смеси стехиометрического состава, % (об.)

D – коэффициент диффузии паров топлива в воздух, $м^2/с$

g – массовая доля вещества

$h_{\text{пл.}}$ – высота некоптящего пламени, мм

H – энтальпия, $H_т^\circ - H_{298}^\circ$, кДж/кг

$\Delta H_{i298,15}^\circ$ – стандартная теплота образования, кДж/кг

$H_{\text{исп}}$ – теплота испарения, кДж/кг

$H_{\text{пл}}$ – теплота плавления, кДж/кг

$H_{\text{тп}}$ – теплопроизводительность горючей смеси , кДж/кг

$\Delta H_{\text{х.р.}}$ – хладоресурс, кДж/кг

$\Delta H_{\text{субл.}}$ – теплота сублимации, кДж/кг

$I_{\text{уд.}}$ – удельный импульс, с или м/с

k – показатель адиабаты

ЛЧ – люминометрическое число

L_{m} – мольный стехиометрический коэффициент, моль воздуха/моль горючего

L_{o} – стехиометрический коэффициент, кг воздуха/кг горючего

L_{v} – объемный стехиометрический коэффициент, $м^3$ воздуха/$м^3$ горючего

M – молекулярная масса

m и n – число атомов водорода и углерода в молекуле

n_D – коэффициент преломления для желтой линии натрия

N – количество молей кислорода, необходимого для полного окисления одного моля горючего

ОЧ – октановое число

p – давление, Па (МПа)

$p_{кр}$ – критическое давление, МПа

$p_{н.п.}$ – давление насыщенных паров, Па

$p_{пр}$ – приведенное давление ($p/p_{кр}$)

p_i – парциальное давление i-ого компонента

$Q_{воспл.}$ – энергия, необходимая для воспламенения горючей смеси, Дж

$Q_В(Q_Н)$ – теплота сгорания высшая (низшая), кДж/кг

Q_V – объемная теплота сгорания (энергоемкость), кДж/дм^3

R – универсальная газовая постоянная

R_0 – удельная газовая постоянная, Дж/(кг·К)

R_D – рефракция, см^3/г

$R_{уд.}$ – удельное электросопротивление, Ом·м, (Ом·см)

r_i – мольная (объемная) доля i-го компонента

S – энтропия, кДж/(кг·К)

T – температура термодинамическая, К

$T_{кр}(t_{кр})$ – критическая температура, К (°С)

t – температура, °С

$t_{ан}$ – анилиновая точка, °С

$t_в$ – температура воспламенения, °С

$t_{всп}$ – температура вспышки, °С

$t_ж$ – жаропроизводительность смеси стехиометрического состава, °С

$t_{кип}$ – температура выкипания 50% (об.), °С

$t_{к.к.}$ – температура конца кипения (или выкипания 98% (об.)), °С

$t_н$, $t_в$ – температуры, соответствующие $\alpha_н$ и $\alpha_в$, °С

$t_{н.к.}$ – температура начала кипения, °С

$t_{н.кр.}$ – температура начала кристаллизации, °С

$t_{св.}$ – температура самовоспламенения, °С

$U_н$ – нормальная скорость распространения пламени, см/с

$U_н^*$ – максимальная нормальная скорость распространения пламени, см/с

V – объем, м^3

Z – фактор сжимаемости

$Z_{кр}$ – критический фактор сжимаемости

α – коэффициент избытка окислителя (воздуха)

$\alpha_н$, $\alpha_в$ – коэффициент избытка окислителя (воздуха), соответствующий нижнему и верхнему концентрационным пределам распространения пламени

α_t – температурный коэффициент линейного расширения, К$^{-1}$; изобарный коэффициент термического расширения, К$^{-1}$

$\alpha_{кр}$ – коэффициент Риделя

$\beta_{ад.}$ – коэффициент адиабатической сжимаемости, Па$^{-1}$

$\beta_{из.}$ – коэффициент изотермической сжимаемости, Па$^{-1}$

β_t – температурный коэффициент объемного расширения, К$^{-1}$

ε – относительная диэлектрическая проницаемость

ε/k – параметр потенциала Штокмайера, К

$\eta_т$ – коэффициент полноты сгорания топлива

λ – теплопроводность, Вт/(м·К), Вт/(см·К)

μ – динамическая вязкость, Па·с; электрический момент диполя, Д; относительная магнитная проницаемость

ν – кинематическая вязкость, м^2/с , мм^2/с

ρ – плотность вещества, кг/м^3

$\rho_{кр}$ – плотность вещества в критическом состоянии, кг/м^3

σ – поверхностное натяжение, Н/м; параметр потенциала Леннарда-Джонса, Å

χ – удельная электропроводимость, (Ом·м)$^{-1}$, (Ом·см)$^{-1}$; удельная магнитная восприимчивость, м^3/кг

ω – фактор ацентричности

Примечание: индекс 20, 25 и т.д. у показателей (ρ_{20}, λ_{25} и др.) обозначает температуру в °С.

АНТР – антрацен
Б-S – бинор-S
ГДН – гидрированные димеры норборнадиена
ДКБ – декаборан
ИБ-S – изомеризованный бинор-S
ИПБ – изопропилбензол
ИББ – изобутилбензол
ИПМК – изопропилметакарборан
ЛПГ – легкоплавкие горючие
МЦГ – метилциклогексан
ПЭ – полиэтилен
ПЭ-I – полиэтилен высокого давления с молекулярной массой 18000–25000
ПЭ-II – полиэтилен высокого давления с молекулярной массой 25000–35000
ПЭН – полиэтилен низкого давления – смесь полимергомологов этилена с числом СН – групп от 1000 до 2000 и более
СТГ – суспензионные тиксотропные горючие
ТУ – технический углерод

Глава 1

ЖИДКИЕ УГЛЕВОДОРОДНЫЕ ГОРЮЧИЕ

Начиная с середины 70-х годов, в нашей стране и за рубежом ведутся работы по созданию горючих для ЛА разного целевого назначения. Требования, предъявляемые к горючим, очень разнообразны и определяются спецификой решаемой проблемы. Наиболее очевидными являются требования высокой массовой и объемной теплот сгорания горючего, а также высокой полноты сгорания (на уровне 91–99%) в условиях реальной камеры сгорания. Не менее важными являются и экологические требования.

В ведущих странах (США, Англия, Франция и др.) уделяется большое внимание проблеме создания жидких углеводородных энергоемких горючих. В США разработано около десятка таких горючих для БПЛА.

В 70–90 гг. в нашей стране были разработаны несколько энергоемких горючих для БПЛА. Некоторые из них (горючее Т-6, децилин и др.) по эксплуатационным свойствам не уступают зарубежным [1.1–1.11].

1.1. Горючее Т-1

Горючее Т-1 (ГОСТ 10227-86) было разработано Институтом нефтехимических процессов им. Мамедалиева АН Азербайджана при участии ЦИАМ. Это было первое отечественное стандартное реактивное горючее, которое длительное время являлось основным для дозвуковой и сверхзвуковой авиации (с ограниченной продолжительностью сверхзвукового полета). Горючее Т-1 до сих пор применяется в ракетах с ЖРД. Разработка технических требований на горючее Т-1, исследование опытных образцов, разработка и внедрение ГОСТ проводились в отделе химмотологии ЦИАМ [1.5–1.7].

Углеводородный состав горючего Т-1, % (мас.): парафиновых 24–42; олефиновых 1,0–1,3; нафтеновых 42–69; ароматических 14–20. Брутто-формула – $C_{12,8}H_{24,12}$. В горючем Т-1 содержатся также сернистые, азотистые и кислородсодержащие соединения, смолы и др. примеси. Содержание общей серы не более 0,1% (мас.), сульфидной 0,02–0,03% (мас.).

Термоокислительная стабильность в статических условиях при 150 °С характеризуется следующими данными: содержание осадка не более 35 мг/100 мл; растворимых смол не более 28 мг/100 мл.

Данные по физическим и теплотехническим свойствам горючего Т-1 приведены в табл. 1.1–1.18.

Таблица 1.1. Растворимость газов в горючем Т-1 при температуре 20 °С и давлении 0,101 МПа [1.4]

Коэффициент	Воздух	N_2	O_2	CO_2
Бунзена, α, $м^3/м^3$	0,1540	0,1370	0,2190	1,39
Кюна, ν, 10^3 $м^3/кг$	0,1880	0,1670	0,2670	1,69
Рауля, δ, 10^3 кг/100 $м^3$	0,0199	0,0177	0,0283	0,18
Генри, К, 10^{-5} кг/($м^3$·Па)	0,1990	0,1770	0,2830	1,80

Таблица 1.2. Максимальная растворимость воды в горючем Т-1 при давлении 0,101 МПа и относительной влажности воздуха 100% [1.4]

t, °С	C_{H_2O}, %(мас.)	t, °С	C_{H_2O}, %(мас.)	t, °С	C_{H_2O}, %(мас.)
−10	0,001880	15	0,005847	40	0,016541
−5	0,002379	20	0,007250	45	0,020163
0	0,002997	25	0,008956	50	0,024502
5	0,003760	30	0,011025	60	0,035863
10	0,004698	35	0,013527	–	–

Таблица 1.3. Физические свойства горючего Т-1 [1.4]

Показатель	Величина	Показатель	Величина
M	178,1	$T_{кр}$, К (°С)	660 (387)
g_c, % (мас.)	82,2–86,5	$p_{кр}$, МПа	2,3
$g_н$, % (мас.)	13,5–13,7	$\rho_{кр}$, $кг/м^3$	252
ρ_{20}, $кг/м^3$	$\geqslant 800$*)	μ_{20}, 10^{-3} Па·с	1,36
$p_{кр}$, Па	908,8 (20 °С)	ν_{20}, $мм^2/с$	$\geqslant 1,50$*)
α_{20}, $10^{-3}К^{-1}$	0,8697	λ_{20}, Вт/(м·К)	0,1168
$t_{н.кр.}$, °С	$\leqslant -60$*)	D_{20}, 10^{-6} $м^2/с$	5,24
$t_{н.к.}$, °С	$\leqslant 150$*)	σ_{20}, 10^{-3} Н/м	26,79
$t_{кип}$, °С	$\leqslant 225$*)	a_{20}, м/с	1292
$t_{к.к.}$, °С	$\leqslant 280$*)	ПДК, $мг/м^3$	300
χ, 10^{-12} (Ом·м)$^{-1}$	2,4	Кл. опасности	4

*) По ГОСТ 10227-86

Таблица 1.4. Теплотехнические свойства горючего Т-1 [1.4]

Показатель	Величина	Показатель	Величина
$Q_{\text{Н}}$, кДж/кг	$\geqslant 42900^{*)}$	$C_{\text{В}}$, % (об.)	8,0
Q_{V}, кДж/дм^3	35045	$t_{\text{н}}$, °С	50
$H_{\text{ТП}}$, кДж/кг	2754	$t_{\text{в}}$, °С	105
$\Delta H_{\text{исп., 20}}$, кДж/кг	357	$n_{\text{D,20}}$	1,489
C_{p20}, кДж/(кг·К)	1,921	ε_{20}	2,118
R_0, Дж/(кг·К)	53,52	ЛЧ	50
$L_{\text{о}}$, кг возд./кг горюч.	14,61	$h_{\text{пл}}$, мм	$\geqslant 20^{*}$
$t_{\text{всп}}$, °С	$\geqslant 30$	$t_{\text{ж}}$, °С	2124^{*}
$t_{\text{св}}$, °С	220	$Q_{\text{воспл.}}$, 10^{-3} Дж	0,20–0,25
$C_{\text{Н}}$, % (об.)	1,8	$U_{\text{Н}}^{*}$, см/с	38–40

*) По ГОСТ 10227-86

Таблица 1.5. Давление насыщенных паров предварительно дегазированного горючего Т-1 при соотношении $V_{\text{ж}}/V_{\text{г}} = 4$ [1.4]

t, °С	$p_{\text{н.п.}}$, 10^5 Па	t, °С	$p_{\text{н.п.}}$, 10^5 Па	t, °С	$p_{\text{н.п.}}$, 10^5 Па
20	0,009088	160	0,90053	300	9,05460
40	0,022536	180	1,37711	320	11,49660
60	0,050111	200	2,02698	340	14,37170
80	0,101786	220	2,87044	360	17,71450
100	0,191623	240	3,95603	380	21,55650
120	0,338266	260	5,32254	–	–
140	0,565150	280	7,00921	–	–

Давление насыщенных паров горючего Т-1:
- при $330 \leqslant T \leqslant 473$:

$$\lg p_{\text{н.п.}} = 9{,}1342 - 1810{,}48/T, \qquad (1.1)$$

- при $453 \leqslant T \leqslant T_{\text{кр}}$:

$$\lg p_{\text{н.п.}} = 9{,}0325 - 1762{,}83/T, \qquad (1.2)$$

где $p_{\text{н.п.}}$ – в Па, T – в К.

Таблица 1.6. Плотность горючего Т-1 при давлении 0,1-1,0 МПа [1.4]

t, °С	ρ, кг/м^3	t, °С	ρ, кг/м^3	t, °С	ρ, кг/м^3
−60	867,2	40	795,7	140	724,2
−40	853,0	60	781,4	160	709,9
−20	838,6	80	767,1	180	695,6
0	824,2	100	752,8	200	681,3
20	810,0	120	738,5	–	–

Таблица 1.7. Плотность горючего Т-1 на линии насыщения [1.4]

t, °С	ρ, кг/м^3	t, °С	ρ, кг/м^3		t, °С	ρ, кг/м^3	
	ж		ж	г		ж	г
−60	878,1	80	778,2	–	220	659,6	12,19
−40	863,8	100	763,9	0,971	240	635,1	16,65
−20	849,6	120	749,6	1,640	260	609,2	22,52
0	835,3	140	735,3	2,654	280	581,8	29,88
20	821,0	160	728,0	4,062	300	551,2	39,44
40	806,7	180	705,9	6,042	340	481,3	69,27
60	792,4	200	687,2	8,705	360	436,2	94,27

Таблица 1.8. Изобарный коэффициент расширения горючего Т-1 при давлении 0,101 МПа [1.4]

t, °С	α_t, 10^{-3} К$^{-1}$	t, °С	α_t, 10^{-3} К$^{-1}$	t, °С	α_t, 10^{-3} К$^{-1}$
−60	0,8131	40	0,8851	140	0,9710
−40	0,8265	60	0,9010	160	0,9902
−20	0,8404	80	0,9175	180	1,0102
0	0,8548	100	0,9347	200	1,0311
20	0,8697	120	0,9525	220	1,0528

Динамическая вязкость горючего Т-1 при $213 \leqslant T \leqslant 473$:

$$\lg\lg(10^3\mu + 1) = 457{,}762/T - 1{,}99834, \qquad (1.3)$$

где μ – в Па·с, T – в К. Погрешность не более 6%.

Таблица 1.9. Динамическая и кинематическая вязкость горючего Т-1 [1.4]

t, °С	$\mu, 10^{-3}$ Па·с	ν, мм^2/с	t, °С	$\mu, 10^{-3}$ Па·с	ν, мм^2/с	t, °С	$\mu, 10^{-3}$ Па·с	ν, мм^2/с
−60	23,47	26,73	0	2,050	2,460	120	0,398	0,531
−50	12,59	14,14	20	1,360	1,660	140	0,339	0,461
−40	7,42	8,59	40	0,980	1,210	160	0,293	0,406
−30	4,86	5,75	60	0,741	0,935	180	0,256	0,362
−20	3,51	4,13	80	0,586	0,753	200	0,226	0,326
−10	2,58	3,12	100	0,477	0,625	–	–	–

Кинематическая вязкость горючего Т-1 при $213 \leqslant T \leqslant 473$:

$$\lg\lg(10^6\nu + 1) = 414{,}742/T - 1{,}78791, \qquad (1.4)$$

где ν – в м^2/с, T – в К. Погрешность 3%.

Таблица 1.10. Динамическая вязкость паров горючего Т-1 при давлении 0,101 МПа [1.4]

t, °С	$\mu, 10^{-6}$ Па·с	t, °С	$\mu, 10^{-6}$ Па·с	t, °С	$\mu, 10^{-6}$ Па·с
−60	4,118	100	7,211	260	10,305
−40	4,505	120	7,598	280	10,691
−20	4,891	140	7,985	300	11,078
0	5,278	160	8,371	320	11,465
20	5,665	180	8,758	340	11,851
40	6,051	200	9,145	360	12,238
60	6,438	220	9,531	380	12,625
80	6,825	240	9,918	400	13,011

Таблица 1.11. Теплопроводность жидкого горючего Т-1 [1.4]

t, °С	λ, Вт/(м·К)	t, °С	λ, Вт/(м·К)	t, °С	λ, Вт/(м·К)
−60	0,1280	40	0,1140	140	0,1000
−40	0,1252	60	0,1106	160	0,0972
−20	0,1234	80	0,1084	180	0,0944
0	0,1196	100	0,1056	200	0,0916
20	0,1168	120	0,1028		

Таблица 1.12. Теплопроводность паров горючего Т-1 [1.4]

t, °С	λ, Вт/(м·К)	t, °С	λ, Вт/(м·К)	t, °С	λ, Вт/(м·К)	t, °С	λ, Вт/(м·К)
−60	0,00807	40	0,01548	140	0,02474	240	0,03569
−40	0,00940	60	0,01719	160	0,02679	260	0,03807
−20	0,00987	80	0,01897	180	0,02892	280	0,04032
0	0,01229	100	0,02083	200	0,03111	300	0,04302
20	0,01385	120	0,02275	220	0,03337		

Таблица 1.13. Коэффициент диффузии горючего Т-1 в воздух при давлении 0,101 МПа [1.4]

t, °С	$D, 10^{-6}$ м^2/с	t, °С	$D, 10^{-6}$ м^2/с	t, °С	$D, 10^{-6}$ м^2/с	t, °С	$D, 10^{-6}$ м^2/с
0	4,64	100	7,93	200	11,94	300	16,60
20	5,24	120	8,68	220	12,82	340	18,64
40	5,87	140	9,45	240	13,72	360	19,70
60	6,53	160	10,25	260	14,66	380	20,78
80	7,22	180	11,08	280	15,61	400	21,88

Таблица 1.14. Поверхностное натяжение горючего Т-1 [1.4]

t, °С	$\sigma, 10^{-3}$ Н/м	t, °С	$\sigma, 10^{-3}$ Н/м	t, °С	$\sigma, 10^{-3}$ Н/м	t, °С	$\sigma, 10^{-3}$ Н/м
−60	34,41	40	24,95	160	14,55	260	6,960
−40	32,47	60	23,14	180	12,95	280	5,600
−20	30,55	80	21,35	200	11,38	300	4,300
0	28,66	100	19,60	220	9,85	340	1,970
20	26,79	120	17,88	240	8,38	360	0,974

Поверхностное натяжение горючего Т-1 при $223 \leqslant T \leqslant 573$:

$$\sigma = 50{,}8792 \cdot 10^{-3} - 71{,}88 \cdot 10^{-6}T - 10{,}0198 \cdot 10^{-8}T^2 + 1{,}4303 \cdot 10^{-10}T^3 \quad (1.5)$$

где σ – в Н/м, T – в К.

Совместимость с материалами. Горючее Т-1 совместимо с конструкционными и резинотехническими материалами, применяемыми в теплонапряженных авиационных и ракетных двигателях.

Противоизносные свойства. По данным ВНИИ НП и ЦИАМ горючее Т-1 обладает высокими противоизносными свойствами: износ

плунжеров топливных насосов НР-21Ф2 не превышает 0,15–0,27 мм; износ шаров – не более 3,11–3,35 мм.

Таблица 1.15. Скорость звука в горючем Т-1 [1.4]

t, °С	a, м/с		t, °С	a, м/с при р=10 МПа
	0,1 МПа	10 МПа		
–60	1675	1686	200	781
–40	1564	1576	220	736
–20	1464	1477	240	694
0	1374	1388	260	653
20	1292	1306	280	614
40	1216	1231	300	577
60	1145	1162	320	542
80	1079	1097	340	509
100	1017	1037	360	479
120	959	980	380	453
140	904	927		
160	850	876		
180	799	827		

Таблица 1.16. Диэлектрическая проницаемость горючего Т-1 [1.4]

t, °С	–60	–20	20	60	100	140
ε	2,239	2,178	2,118	2,062	2,010	1,963
Δ^*	±0,012	±0,010	±0,009	±0,008	±0,010	±0,014

*Δ – доверительный интервал значений ε с вероятностью 0,95

Получение. По способу получения горючее Т-1 относится к прямогонным. Его получают непосредственно из отогнанных фракций нефти без их глубокой переработки.

Перспективы применения. Горючее Т-1 применяется в БПЛА с ЖРД.

Токсические свойства. Горючее Т-1 по токсическим свойствам относится к четвертому классу малоопасных веществ. Предельно допустимая концентрация паров Т-1 в воздухе рабочей зоны 300 мг/м^3. Горючее обладает наркотическим действием и поражает, главным образом, центральную нервную систему. Повышает возбудимость человека, вызывает головокружение, сердцебиение, вегетативные расстройства,

Таблица 1.17. Теплота испарения горючего Т-1 [1.4]

t, °С	$\Delta H_{исп.}$, кДж/кг	t, °С	$\Delta H_{исп.}$, кДж/кг	t, °С	$\Delta H_{исп.}$, кДж/кг
–60	385	100	324	260	234
–40	379	120	314	280	218
–20	372	140	305	300	201
0	365	160	295	320	181
20	357	180	284	340	157
40	349	200	273	360	125
60	341	220	261	380	73,3
80	332	240	248		

Таблица 1.18. Изобарная теплоемкость горючего Т-1 при давлении 0,101 МПа [1.4]

T, К	C_p, кДж/(кг·К)	T, К	C_p, кДж/(кг·К)	T, К	C_p, кДж/(кг·К)
210	1,631	310	1,955	400	2,280
230	1,691	330	2,026	410	2,318
250	1,754	350	2,097	430	2,394
270	1,820	370	2,169	440	2,432
290	1,887	390	2,243	450	2,471

общую слабость. Раздражает слизистые оболочки глаз и носоглотки, вызывает раздражение верхних дыхательных путей.

При работе с высокими концентрациями необходимо пользоваться шланговыми противогазами ПШ-5, ДПА-5 и др.

1.2. Горючее нафтил

Нафтил представляет собой смесь углеводородов, %(об.): нафтены – 85–88, изопарафины – 12–10, моноциклические ароматические – 2,5–3,0. Бициклические ароматические и непредельные углеводороды, а также неуглеводородные примеси практически отсутствуют. Горючее содержит антиокислительную присадку – ионол – в количестве 0,005–0,006% (мас.). Брутто-формула нафтила – $C_{12,79}H_{24,52}$ [1.1, 1.2].

Данные по растворимости газов в нафтиле представлены в табл. 1.19.

Растворимость воды в нафтиле при температурах 20 и 50 °С составляет 0,0041 и 0,0096% (мас.) соответственно.

Данные по термической стабильности приведены в табл. 1.20.

Таблица 1.19. Растворимость газов в нафтиле ($см^3$/г-моль) [1.1]

t, °C	–40	–20	0	20	50
Воздух	0,1323	0,1401	0,1450	0,1472	0,1499
Азот	0,1114	0,1147	0,1220	0,1265	0,1351
Гелий	0,0077	0,0148	0,0186	0,0220	0,0297

Таблица 1.20. Термостабильность нафтила в статических условиях[1)] [1.1]

t, °C	$g_г$, %(мас.)	$g_к$, %(мас.)	$g_г$, %(мас.)	$g_к$, %(мас.)	$g_г$, %(мас.)	$g_к$, %(мас.)
	$\tau = 5$ мин		$\tau = 10$ мин		$\tau = 20$ мин	
470	–	–	–	–	25,9	следы
480	–	–	13,5	отс.	33,2	5,1
490	10,8	отс.	22,2	4,0	40,1	8,9
500	18,0	отс.	26,3	6,8	43,6	13,1
510	19,8	1,5	28,5	9,7	–	–

[1)] $g_г$ – выход газа; $g_к$ – содержание кокса; τ – время выдержки при заданной температуре

Данные по термоокислительной стабильности нафтила приведены в табл. 1.21 и 1.22.

Таблица 1.21. Термоокислительная стабильность нафтила в динамических условиях[1)] (продолжительность циркуляции горючего 6 часов) [1.1]

$t_п$, °C	200	300	400	500	600
$t_ж$, °C	120	158	165	210	230
$g_{ф.с.}$, мг/100 $см^3$	46–51	66–86	88–91	158–166	204–206

[1)] $t_п$ и $t_ж$ – температура печи и жидкости; $g_{ф.с.}$ – содержание фактических смол

Таблица 1.22. Термоокислительная стабильность нафтила в статических условиях [1.1]

$t_ж$, °C	115	190	200
Осадок на фильтре, мг/100 $см^3$	отс.	1,8	1,8
Смол в жидкости, мг/100 $см^3$	97,5	195	348
Осадок на дне стакана	отс.	отс.	отс.

Данные по физическим и теплотехническим свойствам нафтила представлены в табл. 1.23–1.33.

Таблица 1.23. Физические свойства нафтила [1.1]

Показатель	Величина	Показатель	Величина
M	178,34	$p_{кр}$ [1)], МПа	2,392
g_C, %(мас.)	86,41	$\rho_{кр}$ [1)], кг/м^3	298,33
g_H, %(мас.)	13,59	$Z_{кр}$ [1)]	0,2588
ρ_{20}, кг/м^3	832,7	μ, 10^{-3} Па·с	2,42
$t_{н.кр.}$, °С	-60 [2)], -100 [3)]	ν_{20}, мм^2/с	2,90
$t_{кип}$, °С	$\leqslant 210$	λ_{20}, Вт/(м·К)	0,1221
$t_{к.к.}$, °С	$\leqslant 270$	$n_{D,20}$	1,4565
$p_{н.п.}$, Па	773 (20 °С)	ε_{20}	2,1
$T_{кр}$ [1)], К(°С)	664,4 (391,2)	Кл. опасности	4

[1)] Расчетные значения, [2)] по ТУ 38.001244–81, [3)] фактическая величина

Таблица 1.24. Теплотехнические свойства нафтила [1.1]

Показатель	Величина	Показатель	Величина
Q_H, кДж/кг	43124	$C_{стех.}$, % (об.)	1,07
$Q_{V,\,20}$, кДж/дм^3	35797	U_H^*, см/с	~ 40
$H_{ТП}$, кДж/кг	2944	$Q_{воспл.}$, 10^{-3} Дж	$\sim 0,23$
C_{p20}, кДж/(кг·К)	1,898	C_H, % (об.)	1
R_0, Дж/(кг·К)	46,62	C_B, % (об.)	6
L_o, кг возд./кг горюч.	14,65	α_B	0,169
L_m, моль возд./моль горюч.	92,35	α_H	$\sim 1,07$
L_v, м^3 возд./м^3 горюч.	99,07	$t_н$, °С	54,5
$t_{св}$, °С	220	$t_в$, °С	99,5
$t_ж$, °С	~ 2130	N, моль O_2/моль гор.	18,92
$t_{всп}$, °С	60–73	ЛЧ	56

Таблица 1.25. Давление насыщенных паров нафтила [1.1]

t, °С	80	100	120	140	160
$p_{н.п.}$, Па	6318	8824	13890	20928	35018

Таблица 1.26. Плотность нафтила [1.1]

t, °C	−60	−40	−20	0	20	40	60
ρ, кг/м^3	892	877	863	848	833	820	805
t, °C	80	100	120	140	160	180	200
ρ, кг/м^3	790	776	762	748	733	718	704

Таблица 1.27. Динамическая и кинематическая вязкость нафтила [1.1]

t, °C	−60	−50	−40	−20	0	20	40
$\mu, 10^{-3}$, Па·с	89,2	35,4	19,3	7,94	4,92	2,42	0,98
ν, мм^2/с	100	40,0	22,0	9,20	5,80	2,9	1,2

Таблица 1.28. Теплопроводность нафтила в жидком состоянии при давлении 0,101 МПа [1.1]

t, °C	λ, Вт/(м·К)	t, °C	λ, Вт/(м·К)	t, °C	λ, Вт/(м·К)	t, °C	λ, Вт/(м·К)
−60	0,1330	40	0,1194	140	0,1058	240	0,0922
−40	0,1303	60	0,1167	160	0,1031	260	0,0895
−20	0,1276	80	0,1140	180	0,1004	280	0,0868
0	0,1249	100	0,1113	200	0,0977	300	0,0841
20	0,1221	120	0,1086	220	0,0950		

Таблица 1.29. Теплопроводность нафтила при различных температурах и давлениях [1.1]

t, °C	λ, Вт/(м·К), при p, МПа							
	0,098	0,196	4,9	9,8	19,6	29,4	39,2	49,0
20	0,122	0,122	0,122	0,123	0,124	0,126	0,127	0,128
50	0,119	0,119	0,119	0,120	0,121	0,123	0,123	0,124
100	0,112	0,112	0,113	0,114	0,116	0,117	0,120	0,121
150	0,105	0,105	0,106	0,107	0,110	0,113	0,115	0,116
200	0,098	0,099	0,100	0,102	0,106	0,108	0,112	0,113
250	–	0,093	0,094	0,097	0,100	0,104	0,107	0,109
300	–	0,086	0,088	0,091	0,097	0,100	0,104	0,107
350	–	0,077	0,081	0,086	0,092	0,097	0,100	0,102

Таблица 1.30. Теплопроводность газообразного нафтила при давлении 0,101 МПа [1.1]

t, °С	$\lambda, 10^{-3}$ Вт/(м·К)	t, °С	$\lambda, 10^{-3}$ Вт/(м·К)	t, °С	$\lambda, 10^{-3}$ Вт/(м·К)
0	11,27	100	19,08	200	28,52
20	12,70	120	20,83	300	39,43
40	14,19	140	22,70	400	51,74
60	15,79	160	24,57	500	65,40
80	17,41	180	26,53	600	80,39

Таблица 1.31. Поверхностное натяжение нафтила [1.1]

t, °С	$\sigma, 10^{-3}$ Н/м	t, °С	$\sigma, 10^{-3}$ Н/м	t, °С	$\sigma, 10^{-3}$ Н/м
−40	34,07	20	27,10	80	21,96
−20	31,77	40	25,43	100	20,26
0	29,47	60	23,66	120	18,54

Таблица 1.32. Скорость звука в парах нафтила при давлении 0,101 МПа [1.1]

t, °С	a, м/с	t, °С	a, м/с	t, °С	a, м/с	t, °С	a, м/с
−60	101	10	116	80	130	150	142
−50	103	20	118	90	132	160	144
−40	105	30	120	100	134	170	146
−30	107	40	122	110	135	180	147
−20	110	50	124	120	137	190	149
−10	112	60	126	130	139	200	150
0	114	70	128	140	140		

Получение, хранение, транспортирование. Нафтил получают из продуктов переработки нефти по ТУ 38.001 1244-81.

Нафтил относится к веществам с относительно низкой степенью транспортной опасности: класс 9, подкласс 9.2 по ГОСТ 19433-81. Транспортирование, хранение и сливо-наливные операции проводят под азотом с точкой росы не выше минус 60 °С.

Хранят нафтил в стационарных металлических резервуарах; транспортируют в цистернах типа ЖГЦ-60 и ЖГЦ-73. Гарантийный срок хранения – 10 лет со дня изготовления. При изготовлении нафтила

Таблица 1.33. Изобарная теплоемкость нафтила при давлениях 1 и 10 МПа [1.1]

t, °С	C_p, кДж/(кг·К)		t, °С	C_p, кДж/(кг·К)	
	1 МПа	10 МПа		1 МПа	10 МПа
−60	1,640	1,640	240	2,261	2,700
−40	1,702	1,702	260	2,321	2,783
−20	1,765	1,765	280	2,380	2,872
0	1,831	1,831	300	2,437	2,971
20	1,898	1,898	320	2,493	3,085
40	1,966	1,966	340	2,547	3,230
60	2,035	2,035	360	2,600	2,679
80	2,106	2,106	380	2,651	2,717
100	2,177	2,177	400	2,701	2,757
120	2,249	2,249	420	2,750	2,798
140	2,321	2,321	440	2,797	2,840
160	2,394	2,394	460	2,843	2,881
180	2,469	2,469	480	2,888	2,922
200	2,544	2,544	500	2,931	2,962
220	2,199	2,199			

из вторичного нефтехимического сырья срок хранения – 6 лет. Для обезвоженного нафтила срок хранения по содержанию воды – 5 лет.

Пожароопасные свойства. Нафтил относится к легковоспламеняющимся жидкостям. Температура самовоспламенения 220 °С, температура вспышки 60 °С. В табл. 1.34 приведены данные по температуре самовоспламенения нафтила в зависимости от давления и концентрации кислорода.

Для гашения горящего нафтила можно применять: пенные огнетушители марки ОХП-1, огнетушители углекислотные, песок, перегретый водяной пар, состав СЖБ, кошму.

При работе с горючим необходимо соблюдать общие правила техники безопасности при применении нефтепродуктов.

Токсические свойства. По степени воздействия на организм человека нафтил в соответствии с ГОСТ 12.1.007-76 относится к малотоксичным веществам четвертого класса опасности. Предельно допустимая концентрация (ПДК) паров нафтила в воздухе рабочей зоны 300 мг/м^3; в атмосферном воздухе населенных мест 5 мг/м^3, в воде водоемов 0,1 мг/дм^3.

Таблица 1.34. Температура самовоспламенения нафтила в зависимости от давления и концентрации кислорода Ψ_V в окислителе (по данным В.В. Малышева)

p		$t_{св}$, °С, при Ψ_V				
кПа	мм.рт.ст.	0,03	0.05	0,10	0,21	0,40
120,0	900	239	228	218	210	–
106,6	800	241	230	220	211	–
93,3	700	244	233	222	213	–
80,0	600	247	235	224	214	–
66,7	500	250	238	226	215	–
53,3	400	255	242	229	217	211
40,0	300	263	247	234	221	214
26,7	200	–	261	241	228	219
20,0	150	–	–	247	233	223
13,3	100	–	–	258	240	230
8,0	60	–	–	–	250	240
5,3	40	–	–	–	270	250
4,0	30	–	–	–	–	270

1.3. Горючее Т-6

Горючее Т-6 – высокотермостабильное. Углеводородный состав Т-6: парафиновых 12–20%, нафтеновых 75–80%, ароматических 3–6% (мас.). В нем могут быть серо-, азот- и кислородсодержащие соединения, смолистые продукты и другие примеси [1.1]. Брутто-формула – $C_{13,51}H_{25,34}$. В горючем не должно быть меркаптановой серы и сероводорода. Термоокислительная стабильность в статических условиях при 150 °С характеризуется следующими данными: содержание нерастворимых осадков – не более 6 мг/100 см^3, растворимых смол – не более 60 мг/100 см^3, нерастворимых смол – отсутствие.

Горючее Т-6 имеет высокие энергетические характеристики, обеспечивает надежную работу двигателей различных типов, стабильно при длительном хранении, термостабильно до 300 °С.

Данные по физическим и теплотехническим свойствам горючего Т-6 приведены в табл. 1.35–1.56 и на рис. 1.1–1.3.

Таблица 1.35. Растворимость газов в горючем Т-6 при температуре 20 °С и давлении 0,101 МПа [1.1]

Коэффициент	Воздух	N_2	O_2	CO_2
Бунзена, α, $м^3/м^3$	0,1360	0,1210	0,1930	1,220
Кюна, ν, 10^3 $м^3/кг$	0,1620	0,1440	0,2310	1,470
Рауля, δ, 10^3 кг/100 $м^3$	0,0176	0,0156	0,0249	0,158
Генри, К, 10^{-5} кг/($м^3$·Па)	0,1760	0,1560	0,2490	1,580

Таблица 1.36. Максимальная растворимость воды в горючем Т-6 при давлении 0,101 МПа и относительной влажности воздуха 100% [1.1]

t, °С	C_{H_2O}, %(мас.)	t, °С	C_{H_2O}, %(мас.)	t, °С	C_{H_2O}, %(мас.)
−10	0,001919	15	0,005449	40	0,014487
−5	0,002383	20	0,006640	45	0,017021
0	0,002947	25	0,008067	50	0,020364
5	0,003630	30	0,009768	60	0,028912
10	0,004456	35	0,011789	–	–

Таблица 1.37. Физические свойства горючего Т-6 [1.1]

Показатель	Величина	Показатель	Величина
M	188,35	$T_{кр}$, К (°С)	712(439)
g_c, %(мас.)	86,41	$p_{кр}$, МПа	2,197
$g_н$, %(мас.)	13,59	$\rho_{кр}$, $кг/м^3$	275,3
ρ_{20}, $кг/м^3$	841	$Z_{кр}$	0,254
α_t, $10^{-3}К^{-1}$	0,8383	μ_{20}, 10^{-3} Па·с	3,51
$\beta_{зд.}$, $10^{-10}Па^{-1}$	6,377	ν_{20}, $мм^2/с$	4,17
$\beta_{из.}$, $10^{-10}Па^{-1}$	7,790	D_{20}, 10^{-6}, $м^2/с$	4,465
$t_{н.кр.}$, °С	< -60	σ_{20}, 10^{-3} Н/м	27,89
$t_{н.к.}$, °С	195	λ_{20}, Вт/(м·К)	0,112
$t_{кип}$, °С	224	a_{20}, м/с	1332
$t_{к.к.}$, °С	$\leqslant 315$	ПДК, $мг/м^3$	300
$p_{н.п.}$, Па	388,8 (20 °С)	Кл. опасности	4
	18620 (150 °С)		

Таблица 1.38. Теплотехнические свойства горючего Т-6 [1.4]

Показатель	Величина	Показатель	Величина
$Q_{\text{Н}}$, кДж/кг	43150	$\alpha_{\text{Н}}$	1,76
Q_{V}, кДж/дм^3	36290	$\alpha_{\text{В}}$	0,202
$H_{\text{тп}}$, кДж/кг	2368	$t_{\text{н}}$, °С	28
$\Delta H_{\text{исп.,20}}$, кДж/кг	351	$t_{\text{в}}$, °С	36
C_{p20}, кДж/(кг·К)	1,885	N, моль O_2 / моль гор.	39,4
R_0, Дж/(кг·К)	44,14	$n_{\text{D.20}}$	1,4633
L_{o}, кг возд./кг горюч.	14,59	ε_{20}	2,635
$t_{\text{всп}}$, °С	66–68	ЛЧ	46-56
$t_{\text{св}}$, °С	211–220	$t_{\text{ж}}$, °С	2135
$C_{\text{стех.}}$%(об.)	1,041	$h_{\text{пл}}$, мм	25–26
$C_{\text{Н}}$, % (об.)	0,608	$Q_{\text{воспл.}}$, 10^{-3} Дж	0,23
$C_{\text{В}}$, % (об.)	4,94	$U^*_{\text{Н}}$, см/с	$\approx 39 - 40$

Таблица 1.39. Давление насыщенных паров предварительно дегазированного горючего Т-6 при соотношении $V_{\text{ж}}/V_{\text{г}} = 4$ [1.4]

t, °С	$p_{\text{н.п.}}$, 10^5 Па	t, °С	$p_{\text{н.п.}}$, 10^5 Па	t, °С	$p_{\text{н.п.}}$, 10^5 Па
20	0,003264	160	0,233781	300	3,45978
40	0,007590	180	0,361134	320	4,61327
60	0,015520	200	0,569900	340	6,03697
80	0,030821	220	0,866680	360	7,76693
100	0,055489	240	1,275640	380	9,83964
120	0,094102	260	1,823930	400	12,2913
140	0,151624	280	2,541320	420	15,1582

Давление насыщенных паров горючего Т-6:
- при $350 \leqslant T \leqslant 430$:

$$\lg p_{\text{н.п.}} = 8{,}2899 - 1694{,}95/T, \qquad (1.6)$$

- при $450 \leqslant T \leqslant 690$:

$$\lg p_{\text{н.п.}} = 9{,}2443 - 2123{,}1/T, \qquad (1.7)$$

где $p_{\text{н.п.}}$ – в Па, Т – в К. Погрешность не более 1,5 % (1.6) и 0,02 (1.7).

Таблица 1.40. Плотность горючего Т-6 при различных температурах и давлениях [1.1]

t, °С	ρ, кг/м^3, при p, МПа					
	0,1	1	2	4	6	10
−60	898,1	898,5	898,9	899,9	900,6	902,6
−50	890,1	891,5	891,8	892,8	893,7	895,6
−40	883,8	883,2	884,7	885,7	886,7	888,7
−20	869,6	870,1	870,6	871,7	872,8	874,9
0	855,5	856,0	856,6	857,8	858,9	861,2
20	841,3	841,9	842,6	843,9	841,5	847,7
40	827,2	827,9	828,6	830,0	831,4	834,2
60	813,1	813,8	814,8	816,2	817,8	820,8
80	798,9	799,7	800,6	802,4	804,1	807,5
100	784,7	785,6	786,6	788,5	790,1	794,2
120	770,4	771,4	772,6	774,7	776,8	781,0
140	755,9	757,0	758,3	760,8	763,2	767,9
160	741,3	742,6	744,0	746,8	749,5	757,5
180	726,6	728,0	729,6	732,7	736,8	741,7
200	711,6	713,3	715,1	718,6	722,0	728,7

Плотность горючего Т-6 при $-60 \leqslant t \leqslant 150$ и $p = 0,101$ МПа:

$$\rho = 841{,}3 - 0{,}709(t - 20), \tag{1.8}$$

где ρ – в кг/м^3, t – в °С. Погрешность не более 1%.

Изобарный коэффициент термического расширения горючего Т-6 при $220 \leqslant T \leqslant 450$ и $p = 0,1$ МПа:

$$\alpha_t = (0{,}8852 - 1{,}0156 \cdot 10^{-3}T + 2{,}9054 \cdot 10^{-6}T^2)10^{-3}, \tag{1.9}$$

где α_t – в К$^{-1}$, T – в К. Погрешность не более 0,17%.

Коэффициент изотермической сжимаемости горючего Т-6 при $-50 \leqslant t \leqslant 200$ и $p = 0,1$ МПа:

$$\beta_{\text{из.}} = (7{,}01753 + 0{,}036596 \cdot t + 1{,}11456 \cdot 10^{-4}t^2 + 8{,}75494 \cdot 10^{-7}t^3)10^{-10}, \tag{1.10}$$

где $\beta_{\text{из.}}$ – в Па$^{-1}$, t – в °С. Погрешность не более 0,5%.

Таблица 1.41. Плотность горючего Т-6 на линии насыщения (расчет)

t, °С	ρ, кг/м^3	t, °С	ρ, кг/м^3		t, °С	ρ, кг/м^3	
	ж		ж	г		ж	г
−60	898,0	100	784,2	–	260	659,0	8,794
−40	883,8	120	770,0	–	280	637,2	12,21
−20	869,6	140	755,8	0,8646	300	614,2	16,67
0	855,3	160	741,6	1,2830	320	590,4	22,25
20	841,1	180	727,3	1,9070	340	564,6	29,58
40	826,9	200	720,0	2,9100	360	536,2	39,57
60	812,7	220	700,2	4,3280	380	499,9	57,55
80	798,4	240	679,9	6,2280	400	467,8	71,22
					420	–	99,69

Таблица 1.42. Изобарный коэффициент термического расширения горючего Т-6 при различных температурах и давлениях [1.1]

t, °С	α_t, 10^{-3}, К$^{-1}$, при p, МПа					
	0,1	1	2	4	6	10
−60	0,7983	0,7977	0,7971	0,7959	0,7946	0,7922
−50	0,8018	0,8013	0,8006	0,7993	0,7981	0,7956
−40	0,8085	0,8052	0,8045	0,8031	0,8018	0,7992
−20	0,8149	0,8142	0,8134	0,8118	0,8103	0,8073
0	0,8257	0,8249	0,8239	0,8221	0,8204	0,8169
20	0,8383	0,8374	0,8363	0,8342	0,8322	0,8282
40	0,8529	0,8578	0,8506	0,8482	0,8458	0,8412
60	0,8696	0,8683	0,8669	0,8641	0,8613	0,8561
80	0,8885	0,8870	0,8853	0,8821	0,8789	0,8729
100	0,9097	0,9061	0,9023	0,8987	0,8987	0,8917
120	0,9336	0,9315	0,9292	0,9249	0,9207	0,9127
140	0,9600	0,9576	0,9550	0,9499	0,9450	0,9358
160	0,9894	0,9866	0,9836	0,9776	0,9719	0,9613
180	1,0200	1,0187	1,0151	1,0082	1,0016	0,9893
200	1,0580	1,0541	1,0499	1,0417	1,0341	1,0199

Таблица 1.43. Коэффициент изотермической сжимаемости горючего Т-6 при различных температурах и давлениях [1.1]

t, °С	$\beta_{из.}$, 10^{-10}, $Па^{-1}$, при p, МПа					
	0,1	1	2	4	6	10
−60	5,103	5,108	5,111	5,119	5,151	5,358
−50	5,366	5,352	5,365	5,378	5,419	5,665
−40	5,637	5,629	5,646	5,658	5,705	5,990
−20	6,253	6,259	6,265	6,277	6,337	6,703
0	6,965	6,971	6,980	6,994	7,061	7,517
20	7,790	7,795	7,801	7,815	7,867	7,459
40	8,747	8,767	8,785	8,720	8,867	9,563
60	9,862	9,866	9,871	9,880	9,998	10,871
80	11,169	11,175	11,181	11,188	11,325	12,437
100	12,706	12,707	12,710	12,717	12,890	14,330
120	14,522	14,563	14,602	14,679	14,743	16,633
140	16,675	16,717	16,761	16,856	16,943	19,452
160	19,231	19,279	19,318	19,393	19,557	22,914
180	22,288	22,353	22,423	22,545	22,660	27,168
200	25,875	25,968	26,041	26,204	23,332	32,382

Коэффициент адиабатической сжимаемости горючего Т-6 при $-50 \leqslant t \leqslant 200$ и давлении $p = 0,1$ МПа:

$$\beta_{ад.} = (5,6718 + 3,4007 \cdot 10^{-2}t + 9,3805 \cdot 10^{-5}t^2 + 8,0422 \cdot 10^{-7}t^3)10^{-10}, \quad (1.11)$$

где $\beta_{ад.}$ – в $Па^{-1}$, t – в °С. Погрешность не более 1%.

Динамическая вязкость горючего Т-6 при $213 \leqslant T \leqslant 473$ и давлении $p = 0,101$ МПа:

$$\lg\lg(10^3\mu + 1) = 495,816/T - 1,88926, \quad (1.12)$$

где μ – в Па·с, T – в К. Погрешность не более 5,7%.

Кинематическая вязкость горючего Т-6 при $213 \leqslant T \leqslant 473$ и давлении $p = 0,101$ МПа:

$$\lg\lg(10^6\nu + 1) = 453,168/T - 1,69323, \quad (1.13)$$

где ν – в $м^2/с$, T – в К. Погрешность не более 0,14%.

Таблица 1.44. Коэффициент адиабатической сжимаемости горючего Т-6 при различных температурах и давлениях [1.1]

t, °С	$\beta_{ад}$, 10^{-10}, $Па^{-1}$, при p, МПа					
	0,1	1	2	4	6	10
−60	3,876	3,863	3,850	3,383	3,800	3,743
−50	4,112	4,098	4,083	4,053	4,023	3,964
−40	4,369	4,363	4,336	4,303	4,269	4,204
−20	4,945	4,926	4,904	4,862	4,820	4,739
0	5,611	5,586	5,559	5,506	5,454	5,352
20	6,377	6,345	6,311	6,244	6,177	6,049
40	7,264	7,219	7,175	7,089	7,005	6,843
60	8,280	8,228	8,172	8,062	7,955	7,749
80	9,505	9,402	9,329	9,188	9,050	8,768
100	10,861	10,744	10,679	10,496	10,318	9,979
120	12,501	12,387	12,263	12,023	11,719	11,354
140	14,366	14,290	14,127	13,310	12,508	12,940
160	16,743	16,542	16,326	15,907	15,509	14,768
180	19,483	19,214	18,922	18,365	17,838	16,869
200	22,746	22,332	21,989	21,243	20,645	19,274

Таблица 1.45. Динамическая и кинематическая вязкость горючего Т-6 при $p = 0,101$ МПа [1.1]

t, °С	$\mu, 10^{-3}$ Па·с	ν, $мм^2/с$	t, °С	$\mu, 10^{-3}$ Па·с	ν, $мм^2/с$	t, °С	$\mu, 10^{-3}$ Па·с	ν, $мм^2/с$
−60	368,7	380,3	0	6,36	7,44	120	0,725	0,942
−50	140,0	151,1	20	3,51	4,17	140	0,599	0,793
−40	53,02	59,99	40	2,23	2,70	160	0,505	0,681
−30	25,11	29,53	60	1,560	1,92	180	0,433	0,595
−20	14,69	16,90	80	1,158	1,45	200	0,376	0,527
−10	9,19	10,78	100	0,902	1,15	–	–	–

Для пересчета динамической вязкости по давлению рекомендуется уравнение [1.2]:

$$\lg \frac{\mu}{\mu_0} = \frac{10^{-5} p_a - 1}{70,31} \left[0,0239 + 0,01638 \left(10^3 \mu_0\right)^{0,278}\right], \qquad (1.14)$$

где μ – вязкость при t и p, Па·с; μ_0 – вязкость при t и давлении $p = 0,101$ МПа, Па·с; p_a – давление абсолютное, Па.

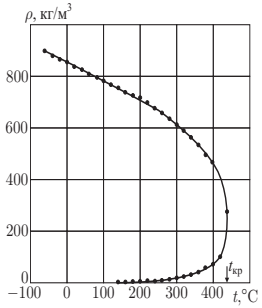


Рис. 1.1. Зависимость плотности горючего Т-6 от температуры на линии насыщения (по данным табл.1.41)

Таблица 1.46. Теплопроводность жидкого горючего Т-6*) при давлении 0,101 МПа [1.1]

t, °C	λ, Вт/(м·К)	t, °C	λ, Вт/(м·К)	t, °C	λ, Вт/(м·К)	t, °C	λ, Вт/(м·К)
−60	0,1229	20	0,1125	100	0,1021	180	0,0917
−40	0,1203	40	0,1099	120	0,0995	200	0,0891
−20	0,1177	60	0,1073	140	0,0969		
0	0,1151	80	0,1047	160	0,0943		

*) Расчет по уравнению (1.15)

Теплопроводность жидкого горючего Т-6 при $p = 0,101$ МПа:

$$\lambda = 0,1125 - 0,130 \cdot 10^{-3}(t - 20), \qquad (1.15)$$

где λ – в Вт/(м·К), t – в °С.

Таблица 1.47. Коэффициент диффузии паров горючего Т-6 в воздух при давлении 0,101 МПа [1.1]

t, °C	D, 10^{-6} м^2/с	t, °C	D, 10^{-6} м^2/с	t, °C	D, 10^{-6} м^2/с	t, °C	D, 10^{-6} м^2/с
0	3,90	100	7,11	200	11,23	300	16,24
20	4,47	120	7,86	220	12,16	320	17,35
40	5,07	140	8,65	240	13,13	340	18,49
60	5,72	160	9,47	260	14,13	360	19,67
80	6,39	180	10,33	280	15,17	380	20,88

Коэффициент диффузии паров горючего Т-6 в воздух при давлении $p = 0,101$ МПа:

$$D = 3,90 \cdot 10^{-6} \left(\frac{T}{273} \right)^{1,924}, \qquad (1.16)$$

где D – в м^2/с, T – в К. Погрешность не более 0,07%.

Таблица 1.48. Поверхностное натяжение горючего Т-6 [1.1]

t, °С	$\sigma, 10^{-3}$ Н/м	t, °С	$\sigma, 10^{-3}$ Н/м	t, °С	$\sigma, 10^{-3}$ Н/м	t, °С	$\sigma, 10^{-3}$ Н/м
−60	34,82	60	24,55	180	15,14	300	6,87
−40	33,06	80	22,92	200	13,67	320	5,64
−20	31,31	100	21,31	220	12,23	340	4,46
0	29,59	120	19,72	240	10,83	360	3,35
20	27,08	140	18,17	260	9,47	380	2,31
40	26,21	160	16,64	280	8,18	400	1,37

Поверхностное натяжение горючего Т-6 при температурах $-60 \leqslant t \leqslant 439$:

$$\sigma = 29,49 - 0,086t + 3,45 \cdot 10^{-5} t^2 + 1,159 \cdot 10^{-21} t^8, \qquad (1.17)$$

где σ – в Н/м, t – в °С. Погрешность не более 0,6%.

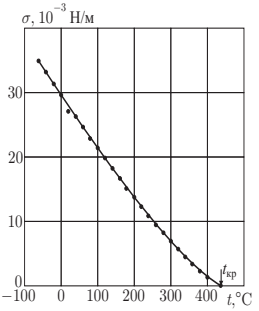


Рис. 1.2. Зависимость поверхностного натяжения горючего Т-6 от температуры: • – по данным табл. 1.48; — – по уравнению (1.17)

Скорость звука в жидком горючем Т-6 при $-60 \leqslant t \leqslant 180$ и давлении $p = 0,101$ МПа:

$$a = 1443 - 3,96725 \cdot t + 0,00391795 \cdot t^2 - 2,62455 \cdot 10^{-6} t^3, \qquad (1.18)$$

где a – в м/с, t – в °С. Погрешность не более 0,08%.

Таблица 1.49. Скорость звука в жидком горючем Т-6 при различных температурах и давлениях [1.1]

t, °С	a, м/с, при p, МПа					
	0,1	1	2	4	6	10
−60	1695	1697	1700	1705	1710	1720
−50	1652	1654	1657	1662	1668	1678
−40	1609	1612	1614	1620	1625	1636
−20	1525	1528	1530	1536	1542	1553
0	1443	1446	1449	1455	1461	1473
20	1365	1368	1371	1378	1384	1396
40	1291	1294	1297	1304	1310	1324
60	1219	1222	1226	1233	1240	1254
80	1150	1153	1157	1165	1172	1187
100	1083	1087	1097	1099	1107	1123
120	1019	1023	1027	1036	1045	1062
140	957	961	966	975	985	1003
160	897	902	907	917	927	947
180	840	845	851	860	873	894
200	786	791	797	808	821	844

Таблица 1.50. Диэлектрическая проницаемость горючего Т-6 [1.11]

t, °С	−60	−20	20	60	100	140
ε	2,247	2,189	2,134	2,083	2,032	1,985
Δ^*	±0,005	±0,003	±0,002	±0,002	±0,003	±0,004

*) Δ – доверительный интервал значений с вероятностью 0,95

Теплота испарения горючего Т-6 при $-60 \leqslant t \leqslant 439$:

$$H_{\text{исп}} = 258{,}783 \left(\frac{439 - t}{195{,}125} \right)^{0{,}398}, \qquad (1.19)$$

где $H_{\text{исп}}$ – в кДж/кг, t – в °С. Погрешность не более 0,5%.

Изобарная теплоемкость жидкого горючего Т-6 при $220 \leqslant T \leqslant 440$:

$$C_p = 1{,}001 + 0{,}0027\,T + 1{,}107 \cdot 10^{-6}\,T^2, \qquad (1.20)$$

где C_p – в кДж/(кг·К), T – в К. Погрешность не более 0,1%.

Таблица 1.51. Теплота испарения горючего Т-6 [1.1]

t, °С	$\Delta H_{исп.}$, кДж/кг	t, °С	$\Delta H_{исп.}$, кДж/кг	t, °С	$\Delta H_{исп.}$, кДж/кг	t, °С	$\Delta H_{исп.}$, кДж/кг
−60	376	60	337	180	290	300	226
−40	370	80	330	200	280	320	212
−20	364	100	322	220	272	340	197
0	358	120	315	240	261	360	180
20	351	140	307	260	250	380	160
40	344	160	298	280	238	400	136

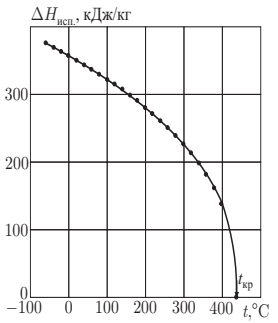


Рис. 1.3. Зависимость теплоты испарения горючего Т-6 от температуры: • – по данным табл. 1.51; — – по уравнению (1.19)

Таблица 1.52. Изобарная теплоемкость жидкого горючего Т-6 при давлении 0,101 МПа [1.1]

T, К	C_p, кДж/(кг·К)	T, К	C_p, кДж/(кг·К)	T, К	C_p, кДж/(кг·К)	T, К	C_p, кДж/(кг·К)
210	1,618	270	1,808	330	2,011	390	2,222
220	1,648	280	1,842	340	2,046	400	2,257
230	1,680	290	1,875	350	2,079	410	2,293
240	1,711	300	1,909	360	2,116	420	2,329
250	1,743	310	1,943	370	2,151	430	2,364
260	1,776	320	1,979	380	2,186	440	2,400