УДК 541.128+546.215+662.7

## ГИПЕРГОЛЬНЫЕ РАКЕТНЫЕ ТОПЛИВА НА ОСНОВЕ ВЫСОКОКОНЦЕНТРИРОВАННОГО ПЕРОКСИДА ВОДОРОДА И ОРГАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ (обзор)

## © Ш. Л. Гусейнов\*\*, С. Г. Федоров\*, В. А. Косых, В. А. Ваулин

Государственный научный центр РФ Акционерное общество «Государственный ордена Трудового Красного Знамени научно-исследовательский институт химии и технологии элементоорганических соединений» (ГНЦ РФ АО «ГНИИХТЭОС»),

105118, г. Москва, ш. Энтузиастов, д. 38 E-mail: \* stan-fed2011@yandex.ru; \*\* rejhan@bk.ru

> Поступила в Редакцию 21 октября 2023 г. После доработки 25 декабря 2023 г. Принята к публикации 25 декабря 2023 г.

Рассмотрены результаты исследований по определению времени задержки воспламенения гипергольных малотоксичных («зеленых») ракетных топлив, в которых в качестве окислителя используется высококонцентрированный пероксид водорода. Показано, что использование жидких и твердых горючих, содержащих катализаторы разложения пероксида водорода (соли марганца, меди) или активно реагирующие с пероксидом водорода соединения (например, NaBH<sub>4</sub>), позволяет получать топливо с временем задержки воспламенения менее 20 мс, что делает возможным их использовать в жидкостных или гибридных ракетных двигателях. Использование в качестве горючего ионных жидкостей в большинстве случаев также требует введения промоторов.

Ключевые слова: ракетные топлива; гипергольные горючие; пероксид водорода; задержка воспламенения

DOI: 10.31857/S0044461823100018; EDN: JZSXZG

#### Введение

Гипергольные (самовоспламеняющиеся при контакте окислителя и горючего) ракетные топлива позволяют упростить конструкцию ракетного двигателя, так как не требуется внешний источник зажигания, подача компонентов в камеру сгорания осуществляется давлением газа (не нужны насосы), двигатель способен многократно запускаться. Однако обычно в таких топливах использовались высокотоксичные горючие (гидразин и его производные) и окислители (HNO<sub>3</sub> и N<sub>2</sub>O<sub>4</sub>). Возможность замены этих компонентов малотоксичными компонентами является предметом обсуждения исследователей во многих странах. Низкий уровень токсичности снижает риск для персонала, работающего с такими ракетными топливами, требует менее строгих мер защиты при обращении с компонентами топлива, позволяет упростить условия их хранения, снизить экономические затраты.

В качестве окислителя для гипергольных «зеленых» ракетных топлив предложен нетоксичный пероксид водорода концентрацией 85–98% (в последнее время основное внимание уделяется H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> концентрацией выше 90%, поскольку такой окислитель обеспечивает больший удельный импульс и меньшее время задержки воспламенения). В качестве

горючих рассматриваются различные малотоксичные органические соединения, для придания которым способности воспламеняться при контакте с H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> вводят добавки, инициирующие экзотермическое разложение пероксида водорода.

Различают каталитические и реакционные гипергольные горючие. Каталитическое горючее получают путем растворения или диспергирования в горючем катализатора разложения  $H_2O_2$ , который способствует быстрому разложению  $H_2O_2$  с выделением высокореакционного атомарного кислорода и тепла, что и приводит к последующему воспламенению. Реакционные горючие содержат добавки, которые способны вступать в реакцию с  $H_2O_2$ , в результате чего происходит экзотермическая реакция с большим выделением тепла, обеспечивающего воспламенение горючего.

Ранее был опубликован ряд обзоров [1–5], в которых рассмотрены исследования в области создания и применения гипергольных ракетных топлив на основе пероксида водорода и органических соединений, а также дан краткий исторический обзор развития работ по гипергольным топливам [4].

Цель обзора — проведение сравнительной оценки времени задержки воспламенения разрабатываемых в 2015–2023 годах гипергольных топливных систем на основе высококонцентрированного пероксида водорода и малотоксичных органических соединений.

#### Гипергольные топлива для жидкостного реактивного двигателя

Использование гипергольных топлив в жидкостных реактивных двигателях с пероксидом водорода в качестве окислителя позволяет упростить конструкцию двигателя, так как нет необходимости в слое катализатора для разложения H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> или во внешнем воспламенителе. Кроме того, имеется возможность повторного воспламенения в импульсном режиме. При выборе гипергольного топлива наиболее важным критерием является время задержки воспламенения при контакте горючего и окислителя, которое определяется капельным или струйным способами. В капельном способе капля H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> падает в чашку с горючим, при этом определяется время от контакта H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> с горючим до воспламенения. В струйном способе в камере сгорания происходит контакт струй из форсунок с Н<sub>2</sub>О<sub>2</sub> и горючим.

Гипергольные топлива на основе пероксида водорода и керосина. Наиболее интересным с экологической точки зрения является двухкомпонентное ракетное топливо для жидкостного ракетного двигателя на основе керосина и H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, незначительно уступающее по энергетической эффективности топливу из высокотоксичных несимметричного диметилгидразина и N<sub>2</sub>O<sub>4</sub>. Оно характеризуется хорошими эксплуатационными свойствами, но не является гипергольным. В работах [4-6] приведены данные о многочисленных попытках разработать гипергольное двухкомпонентное ракетное топливо на основе керосина и высококонцентрированного Н2О2 для жидкостного ракетного двигателя. Для придания керосину гипергольности при контакте с H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> в него вводили катализаторы его разложения или соединения, реагирующие с ним. Однако попытки были безуспешными, так как ни катализаторы разложения (соли марганца, меди, кобальта), ни реагирующие с H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> амины, амиды, гидриды металлов нерастворимы в нем, и добиться их растворимости в керосине с помощью различных добавок не удалось, а суспензии были нестабильны во времени. Описано лишь горючее W2 [7], содержащее 21% керосина, 8% тетрагидрата ацетата марганца, растворенного в метаноле, и жирные спирты с добавкой поверхностно-активного вещества, вводимого для гомогенизации смеси. Время задержки воспламенения такого горючего при контакте с H2O2 составляет в зависимости от концентрации тетрагидрата ацетата марганца (7-20%) от 45 до 7 мс.

О возможности создания гипергольного жидкого углеводородного горючего сообщалось лишь в нескольких работах [3, 6]. Использование растворимого в углеводородах пирофорного триэтилалюминия позволяет придать керосину гипергольность. Раствор 25% (C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>)<sub>3</sub>Al в гексане легко воспламеняется при контакте с H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> [4]. Запатентовано гипергольное ракетное топливо, содержащее в качестве окислителя пероксид водорода концентрацией 81.5-98%, а в качестве горючего — авиационный керосин с растворенной в нем пирофорной добавкой в количестве 10-15%. Добавка представляет собой смесь из 87% триэтилбора и 13% триэтилалюминия и используется в качестве пускового горючего в некоторых ракетных двигателях. Она, так же как и триэтилалюминий, хорошо растворима в керосинах [8]. Детальное исследование этого топлива было проведено в Московском авиационном институте и в Государственном научно-исследовательском институте химии и технологии элементоорганических соединений [6]. Гипергольность определяли как методом падения капли, так и впрыском 84.5%-ного H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> и керосина с пусковым горючим в камеру сгорания. При струйном смешивании надежное воспламенение достигалось, если концентрация пускового горючего превышала 13%.

Гипергольные с пероксидом водорода жидкие горючие на основе спиртов и аминов с каталитическими и реакционными добавками. Довольно активно продолжаются работы по созданию гипергольных двухкомпонентных жидких ракетных топлив на основе пероксида водорода концентрацией 90% и выше и спиртов, азидоэтанола, различных глимов, аминов, пиридина, в которых могут быть растворены либо катализаторы разложения пероксида водорода [2, 9–13], либо NaBH<sub>4</sub> [2, 14–19]. Топлива предназначены для использования в орбитальных маневровых ракетных двигателях.

Известно очень мало катализаторов разложения  $H_2O_2$ , растворимых в органических малотоксичных соединениях. В основном это соли железа и меди. а также иодиды, а из активных добавок наиболее предпочтителен NaBH<sub>4</sub>. Хорошая гипергольность отмечена для пары  $H_2O_2$  с этанолом, в котором растворены соли железа(III). Задержка воспламенения составляла несколько миллисекунд [9]. Cu(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> и CuCl<sub>2</sub> также обеспечивают приемлемое время задержки воспламенения. Бразильскими исследователями для маневрового орбитального двигателя с тягой 50 H разрабатывается гипергольное горючее, содержащее 61% моноэтаноламина, 30% этанола и 9% Cu(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>·3H<sub>2</sub>O. Время задержки воспламенения составляет 15.7 мс [10, 11].

Недавно было проведено исследование гипергольного воспламенения топливной системы с использованием 70–98%-ного пероксида водорода в качестве окислителя и горючего, являющегося смесью тетраметилэтилендиамина, диметиламиноэтанола и метанола или этанола, в которой был растворен CuCl<sub>2</sub> или его гидрат [13]. Комбинация тетраметилэтилендиамина и диметиламиноэтанола обеспечивает синергический эффект уменьшения времени задержки воспламенения при использовании всего 0.5% катализатора. При объемном соотношении тетраметилэтилендиамин:диметиламиноэтанол = 50:50 гипергольное воспламенение было достигнуто всего через 20 мс. Метанол и этанол добавляли для растворимости CuCl<sub>2</sub>.

При исследовании характеристик воспламенения топливной системы этилендиамин/95%-ный H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> в работе [12] продемонстрирован синергический эффект гибридных добавок [реакционная добавка (NaBH<sub>4</sub>) + каталитическая добавка (NaI или NH<sub>4</sub>I)]. Совместное введение 6.5% NaBH<sub>4</sub>–NaI и 3.5% NaBH<sub>4</sub>–NH<sub>4</sub>I в этилендиамин существенно уменьшает время задержки воспламенения (табл. 1). Добавка NaBH<sub>4</sub> к различным горючим на основе глимов и полиаминов также позволяет получать приемлемое время задержки воспламенения (табл. 1). Время задержки воспламенения зависит как от скорости физических процессов (распыления, смешения, испарения и диффузии), так и от скорости химических реакций. Механизм гипергольного воспламенения при столкновении капли пероксида водорода с горючим моноэтаноламином, содержащим NaBH<sub>4</sub>, исследовался в работе [20].

В рассматриваемых работах время задержки воспламенения определяли в основном методом падения капли H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> на поверхность горючего, находящегося в чашке того или иного размера. Поскольку пока не разработано стандартной методики определения времени задержки воспламенения этим методом, во многих работах методики определения несколько отличались друг от друга. В связи с этим приведенные в литературе данные (табл. 1) следует рассматривать, по нашему мнению, как ориентировочные. Кроме того, на время задержки воспламенения рассматриваемых гипергольных топлив большое влияние оказывают давление в камере сгорания и температура горючего и окислителя [15, 19]. В работе [21] для исследования гипергольного горения сталкивающихся струй 95%-ного H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> и горючего на основе амина предложен спектральный метод.

Гелеобразные горючие, гипергольные с пероксидом водорода. В связи с плохой растворимостью в углеводородах большинства катализаторов разложения  $H_2O_2$ , а также NaBH<sub>4</sub> и осаждением этих добавок во времени при хранении проводятся работы по созданию гелеобразных или пастообразных гипергольных с  $H_2O_2$  горючих с активирующими добавками [7, 17–20, 22–34]. Наиболее часто гелеобразователями служат пирогенный диоксид кремния и производные целлюлозы [7, 17–24]. Высокая вязкость композиции горючего препятствует осаждению активирующих добавок при хранении.

В работе [17] проведены экспериментальные исследования задержки воспламенения двухкомпонентного топлива, содержащего гелеобразное тиксотропное горючее на основе этанола и окислитель — H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>. В качестве загустителя этанола использовали производные целлюлозы, а в качестве катализаторов — растворимые в этаноле CuCl<sub>2</sub>·2H<sub>2</sub>O или ацетилацетонат марганца(II). Задержка воспламенения составляла 10–50 мс, что сопоставимо с задержками воспламенения существующих жидких гипергольных двухкомпонентных систем.

В качестве катализаторов для гипергольного двухкомпонентного топлива на основе H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> и тетраметилэтилендиамина были использованы наночастицы переходных металлов [22]. Было обнаружено, что наиболее эффективным катализатором для этой системы

## Таблица 1

Время з	вадержки	воспламенен	ия каталит	ических і	и реакцион	ных горюч	чих при к	онтакте о	с пероксидом	водорода

				1
Горг	очее	Пероксил	Время задержки	Литературный
органическое соединение	инициатор воспламенения (концентрация, мас%)	водорода, мас%	воспламенения, мс	источник
	Каталитичес	кие горючие		
Этанол	Соль Fe(III)	90	Менее 10	[9]
Этаноламин 61%	Cu(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> (9)	90	15*	[10, 11]
Этанол 30%				
Этаноламин	$CuCl_2(5)$	85	200	[2]
Этаноламин	CuCl <sub>2</sub> (10)	85	30	[2]
Этаноламин	CuCl <sub>2</sub> (< 8)	98	16	[2]
Этаноламин	$CuCl_2 \cdot 2H_2O(4)$	98	37	[3]
Этилендиамин	NaBH <sub>4</sub> ·NaI (10)	95	2.75	[12]
Этилендиамин	NaBH <sub>4</sub> ·NH4I (10)	95	2.69	[12]
Тетраметилэтилендиамин +	CuCl <sub>2</sub>	85–98	10-20	[13]
+ диметиламиноэтанол +				
+ метанол	_			
	Реакционны	ые горючие		1
Триглим	NaBH <sub>4</sub> (8)	88.5	10.6	[18]
Триглим	$NaBH_4(5)$	90	9.2	[16]
Триглим	NaBH <sub>4</sub> (8)	93.5	1.06-7.60**	[19]
Триглим	NaBH <sub>4</sub> (5)	98	7	[17]
Триглим	NaBH <sub>4</sub> (7)	98	5.1	[15]
Тетраглим	NaBH <sub>4</sub> (10)	88.5	12	[18]
Тетраглим	NaBH <sub>4</sub> (5)	90	8.7	[16]
Тетраглим	NaBH <sub>4</sub> (5)	90	8.7	[16]
Этаноламин	NaBH <sub>4</sub> (< 8)	98	14	[2]
Этаноламин	NaBH <sub>4</sub> (10)	98	11.9	[3]
Диэтилентриамин	NaBH <sub>4</sub> (5)	90	7.4	[7]
Диэтилентриамин	NaBH <sub>4</sub> (5)	90	29.3	[16]
Диэтилентриамин	NaBH <sub>4</sub> (10)	98	6.5	[3]
Диэтилентриамин, тетраги-	NaBH <sub>4</sub> (12–15)	90	25	[14]
дрофуран	NaBH <sub>4</sub> (12–15)	95	12	[14]
	NaBH <sub>4</sub> (12–15)	98	7	[14]
Пиридин	$NaBH_4(5)$	90	4.9	[7]
Пиридин	NaBH <sub>4</sub> (5)	90	18.7	[16]
Пиридин	NaBH <sub>4</sub> (8)	98	3	[3]

\* Испытания в двигателе с тягой 50 Н.

\*\* В зависимости от давления и температуры.

является серебро. Большое влияние на скорость разложения пероксида водорода оказывает размер и равномерное распределение наночастиц в гелеобразном горючем. Время задержки воспламенения гипергольного топлива составляло 8.8 мс. Малое время задержки воспламенения (менее 15 мс) было отмечено при контакте загущенного тетраметилэтилендиамина, активированного CuCl<sub>2</sub>, с 96%-ным H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> [23].

До настоящего времени большое внимание уделяется разработкам гипергольных топлив на основе пероксида водорода и гелеобразных реакционных углеводородных горючих. Т. L. Connell с сотр. провели исследования по разработке гелеобразного гипергольного горючего на основе н-гептана и н-додекана. Для загущения углеводородов использовался пирогенный диоксид кремния (около 2.5%). Горючее содержало 3–7% NaBH<sub>4</sub> [24–28]. Исследовано влияние на время задержки воспламенения реологических свойств горючего, конструкции инжекторов, механики потоков горючего и окислителя.

Было отмечено, что время задержки воспламенения уменьшается по мере увеличения содержания NaBH<sub>4</sub> до достижения предельного количества NaBH<sub>4</sub>, после которого время задержки воспламенения остается практически постоянным. Повышение температуры реакции, а также летучести горючего уменьшает время задержки воспламенения.

Для определения времени задержки воспламенения и исследования горения был разработан метод сталкивающихся струй горючего и окислителя с одним или несколькими инжекторами [28]. Результаты экспериментов показывают, что процесс воспламенения основан на реакции между H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> и NaBH<sub>4</sub>, сопровождающейся газификацией топлива и выделением тепла, достаточного для самовоспламенения смеси Н<sub>2</sub>О<sub>2</sub>/горючее [28]. Время задержки воспламенения меньше при контакте H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> с горючим, имеющим большую летучесть, и оно незначительно зависит от скорости потоков H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> и горючего. Средняя задержка воспламенения уменьшилась примерно с 78 до 26 мс с увеличением количества NaBH<sub>4</sub> в горючем на основе н-додекана [24, 27, 28]. Снижение концентрации H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> с 88 до 70% привело к увеличению задержки воспламенения примерно с 20 до 400 мс. Это объясняется увеличением доли воды, что требует дополнительной энергии для испарения, и соответственно уменьшением энергии, необходимой для воспламенения.

Продолжаются интенсивные работы по созданию «зеленых» гипергольных двухкомпонентных ракетных топлив на основе керосина и пероксида водорода, энергетические характеристики которых были бы сравнимы с характеристиками топлива на основе монометилгидразина и  $N_2O_4$  [30–34]. По своей природе комбинация керосина и  $H_2O_2$  не является гипергольной. В связи с этим для самовоспламенения в керосин необходимо вводить легко реагирующее с  $H_2O_2$ соединение или катализатор разложения  $H_2O_2$ . Было разработано гелеобразное способное к длительному хранению самовоспламеняющееся при контакте с  $H_2O_2$  углеводородное горючее [30, 31]. В качестве гелеобразователя использовали пирогенный аморфный диоксид кремния. Разработанное горючее содержало 7% NaBH<sub>4</sub>. Оно реагирует с 92%-ным H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> с задержкой воспламенения около 8 мс. Экспериментальные исследования показали осуществимость идеи создания гипергольного ракетного топлива на основе загущенного керосина и H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>. Данные по времени задержки воспламенения для некоторых гелеобразных горючих приведены в табл. 2.

В ряде работ было проведено сравнение энергетических характеристик топлива на основе гелеобразного керосина и пероксида водорода с топливной парой монометилгидразин и N<sub>2</sub>O<sub>4</sub>. По массовому удельному импульсу разрабатываемые топлива несколько уступают топливу на основе монометилгидразина, а по объемному импульсу превосходят. Расчеты показали, что при давлении в камере сгорания 2.0 МПа и коэффициенте расширения  $\varepsilon = 50$  удельный и объемный удельный импульсы для топливной пары монометилгидразин и N<sub>2</sub>O<sub>4</sub> составляют 341 и 409 с, в то время как для топлива на основе гелеобразного керосина и 90%-ного H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> — 328 и 426 с соответственно [33].

Экспериментальные результаты использования этого топлива в различных типах двигателей показали возможность работы как в импульсном, так и в стационарном режимах и способность создавать различные уровни тяги. Горючее и окислитель отличаются очень высокой способностью к самовоспламенению с коротким временем задержки воспламенения, а также эффективностью, превышающей 98%.

Для повышения энергетических характеристик керосина Jet-A1, загущенного пирогенным диоксидом кремния, в него был введен порошок алюминия с размером частиц 6 мкм, на частицы которого нанесено покрытие NaBH<sub>4</sub>. В качестве окислителя в топливе использовали пероксид водорода концентрацией 90 и 98% [34]. Расчеты показали, что по энергетическим характеристикам предложенное горючее с 90%-ным H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> уступает топливу на основе монометилгидразина и N<sub>2</sub>O<sub>4</sub>, а с 98%-ным пероксидом водорода близко к нему.

Авторы [34] полагают, что уменьшение времени задержки воспламенения может быть достигнуто при использовании частиц алюминия субмикрометрового размера с покрытием из NaBH<sub>4</sub>, так как это приведет к увеличению площади поверхности покрытия из NaBH<sub>4</sub> натрия и соответственно площади контакта с  $H_2O_2$ . Также благоприятно и увеличение концентрации  $H_2O_2$  до 98%. Кроме того, было исследовано гелеобразное горючее, содержащее вместо алюминия частицы бора (размером 6 мкм) с покрытием из NaBH<sub>4</sub> (содержание 1 мас%). Среднее время задержки воспламенения для горючих с частицами

	1	[	1	1	1
Горючее	Концентрация	Гелеобразователь	Инициатор воспламенения,	Время задержки	Литературный
	$H_2O_2$ , Mac%	(концентрация, мас%)	(концентрация, мас%)	воспламенения, мс	источник
Этанол	90	Целлюлоза (6)	$CuCl_2 \cdot 2H_2O(1)$	16.67	[7]
Этанол	90	Целлюлоза (8)	$CuCl_2 \cdot 2H_2O(1)$	50	[7]
Этанол	90	Целлюлоза (6)	Ацетилацетонат Mn(II)	12.51	[7]
			(1)		
Этанол	90	Целлюлоза (8)	Ацетилацетонат Mn(II)	19.8	[7]
			(1)		
Тетраметил-	96	$SiO_2(3)$	$CuCl_2 \cdot 2H_2O(1)$	15	[19]
этилендиамин					
Тетраметил-	96	SiO <sub>2</sub> (3)	Ag (1)	8.8	[18, 19]
этилендиамин					
Гептан	88	$SiO_2(3)$	NaBH <sub>4</sub> (3–7)	~8–38	[24]
			$NaBH_4(5)$	25	[24]
Додекан	88	SiO <sub>2</sub> (3)	NaBH <sub>4</sub> (3–7)	~41–28	[24]
			NaBH <sub>4</sub> (6)	21	[24]
Додекан	86	SiO <sub>2</sub> (2.85)	$NaBH_4(6)$	42.66	[20]
Керосин	90	$\operatorname{SiO}_{2}(3)$	$NaBH_4(7)$	8	[21]
Керосин Jet-A1	90	SiO <sub>2</sub> (3), n-Al (5)*	NaBH <sub>4</sub> (3)	9	[22]

Таблица 2 Время задержки воспламенения некоторых гелеобразных горючих

\* n-Al — порошок алюминия с частицами наноразмеров.

бора с покрытием и без него составило 12.3 и 18.5 мс соответственно.

Реологические свойства некоторых гипергольных горючих, содержащих NaBH<sub>4</sub>, были рассмотрены в работах [17, 33, 35, 36], в частности, предел текучести суспензии с частицами NaBH<sub>4</sub>, а также проведены расчеты порога скорости оседания частиц в гелеобразном горючем и другие характеристики суспензии.

В Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (German Aerospace Center) проводятся фундаментальные исследования по разработке технологий получения гелеобразных горючих, их реологии, поведения потока суспензии и способности ее к распылению в камере сгорания, а также исследуются характеристики горения гелей [35].

## Гипергольные гибридные ракетные топлива на основе твердого горючего с каталитическими и активными добавками и пероксида водорода

Сложности в создании гипергольных с H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> жидких углеводородных горючих из-за плохой растворимости в них катализаторов разложения пероксида водорода или активно реагирующих с ним соединений направили усилия исследователей на разработку твердых горючих, содержащих добавки, инициирующие при контакте с H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> воспламенение, для использования таких горючих в гибридных ракетных двигателях.

К преимуществам таких двигателей перед жидкостными и твердотопливными двигателями относятся их более простая конструкция (не нужна система хранения и подачи горючего) и простота обслуживания. Кроме того, в твердое горючее можно добавлять металлы с высокой теплотой сгорания, повышающие удельный импульс. Гибридный ракетный двигатель более безопасен, он не взрывается в процессе горения из-за возможного образования трещин в шашке горючего; ракету можно перевозить без окислителя и заправлять окислителем на месте. Наряду с этим возможны остановка процесса горения в камере сгорания путем прекращения подачи H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> и новый запуск двигателя за счет возобновления подачи Н<sub>2</sub>О<sub>2</sub>. В то же время гибридные ракетные двигатели имеют свои недостатки, например, по мере выгорания твердого горючего меняется тяга, поэтому для сохранения площади горения во многих конструкциях шашка горючего имеет много каналов разной формы, в результате чего уменьшается масса горючего.

Обзор использования H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> концентрацией 70–98% в гибридных двигателях представлен в работе [37]. Твердым горючим служили полиэтилен, в некоторых случаях содержащий алюминий, а также полиметилметакрилат, парафин, полибутадиен с концевыми гидроксильными группами. Однако о гипергольном воспламенении данных почти нет. Воспламенение горючего осуществлялось в основном при контакте с ним нагретых до высокой температуры продуктов разложения  $H_2O_2$ , образующихся при пропускании  $H_2O_2$  через пакет катализатора, а также за счет внешнего источника воспламенения.

В последние годы опубликован ряд статей, в которых исследовалась гипергольность с H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> твердых горючих с добавкой катализаторов и активных соединений. В табл. 3 приведены данные о времени задержки воспламенения некоторых из этих топлив.

Была исследована возможность получения твердого гипергольного с H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> горючего на основе отвержденного добавкой производных целлюлозы этанола и ацетилацетоната марганца [38]. Использование спирта, в котором растворим ацетонилацетонат марганца, способствовало однородному распределению катализатора разложения H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> в горючем. Определение капельным методом времени задержки воспламенения различных композиций такого горючего показало, что оно составляет 43–307 мс, несмотря на большое количество ацетонилацетоната марганца. Кроме того, с учетом необходимости введения добавок воды энергетическая эффективность топлива будет крайне мала.

В Когеа Advanced Institute of Science and Technology разрабатываются технологии получения твердых горючих на основе парафина, полиэтилена и аминоборана, гипергольных с 95%-ным  $H_2O_2$  [39, 40, 42, 43]. Сам  $NH_3 \cdot BH_3$  весьма активно реагирует с  $H_2O_2$ , а его время задержки воспламенения составляет 8.1 мс. Добавка его к парафину даже в количестве 5% делает горючее гипергольным, но время задержки воспламенения не удовлетворяет требованиям по скорости воспламенения (табл. 3).

С целью улучшения гипергольных свойств таких гибридных топлив J. Jeong и сотр. провели поиск наи-

	-	 [	[	
Горючее	I	Концентрация	Время залержки	Литературный
органическое соединение	инициатор воспламенения, (концентрация, мас %)	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> , %	воспламенения, мс	источник
63% этанол + 13% метилцеллюлоза + + 12% H <sub>2</sub> O	Ацетилацетонат Mn(III) (15)	90	242.33	[38]
57% этанол + 13% метилцеллюлоза + + 12% H <sub>2</sub> O	Ацетилацетонат Mn(III) (18)	90	89.50	[38]
54% этанол + 13% метилцеллюлоза + + 12% H <sub>2</sub> O	Ацетилацетонат Mn(III) (21)	90	207.67	[38]
67% этанол + 13% гидроксипропил- метилцеллюлоза + 8% Н <sub>2</sub> О	Ацетилацетонат Mn(III) (12)	90	218.00	[38]
63% этанол + 13% гидроксипропил- метилцеллюлоза + 8% Н <sub>2</sub> О	Ацетилацетонат Mn(III) (16)	90	49.00	[38]
60% этанол + 13% гидроксипропил- метилцеллюлоза + 8% Н <sub>2</sub> О	Ацетилацетонат Mn(III) (19)	90	88.25	[38]
Парафиновый воск	$NH_3 \cdot BH_3 (25) + MnO_2/C (1)$	95	15.00	[39]
Парафиновый воск	$NH_3 \cdot BH_3 (25) + Pt-Ru/C (1)$	95	2.0	[39]
Парафиновый воск	$NH_{3} \cdot BH_{3} (25) + Pd/C (1)$	95	1.2	[39]
Парафиновый воск	$NH_3 \cdot BH_3 (5)$	95	38	[40]
Парафин	NH <sub>3</sub> ·BH <sub>3</sub> (40)	95	9.2	[40]
Полиэтилен	NaBH <sub>4</sub> (25)	90	9 при <i>P</i> = 0.1 МПа,	[41]
			4 при <i>P</i> = 1 МПа	
Полиэтилен	NaBH <sub>4</sub> (33)	90	7	[41]
Полиэтилен	NH <sub>3</sub> ·BH <sub>3</sub> (25)	95	20.8	[42]
Полиэтилен	$NH_3 \cdot BH_3 (25) + Pd/C (1)$	95	9.8	[42]

# Таблица 3

Время задержки воспламенения некоторых гибридных топлив

более активных катализаторов разложения 95%-ного H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>. Металлы Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Ru, Pd, Pt, Pt–Ru и Pb были нанесены на подложки из активированного углерода в количестве 20% [42]. Определение активности методом падения капли показало, что наиболее активными катализаторами являются Pt/AC, Ru/AC и Pt–Ru/AC, время задержки воспламенения которых составляло 0.3 мс. Введение даже 1% этих катализаторов в полиэтилен или парафин, содержащих NH<sub>3</sub>·BH<sub>3</sub>, приводит к сверхмалому времени задержки воспламенения — 2.0 и 1.2 мс [42].

Исследование гипергольных свойств топливной пары 90%-ный Н<sub>2</sub>О<sub>2</sub> и полиэтилен, содержащий 25% NaBH<sub>4</sub>, показало, что время задержки воспламенения топлива зависит от давления, размера частиц NaBH4 (использовали два типа NaBH<sub>4</sub> — с размером частиц 50-100 и 200-500 мкм), а также от метода испытания [44, 45]. При атмосферном давлении и комнатной температуре задержка составила 5-10 мс. Повышение давления приводит к уменьшению времени задержки воспламенения. При давлении 10 бар время задержки воспламенения составляло всего 2.93 мс. В случае испытания с использованием радиального впрыска окислителя и его контакта с полой цилиндрической поверхностью твердого время задержки воспламенения горючего составило 23.1 мс. Было установлено, что теоретический удельный импульс испытанных топлив сопоставим с удельным импульсом других жидких гипергольных ракетных топлив, а также с удельным импульсом обычных комбинаций гибридных топлив.

Комплексное исследование характеристик воспламенения гипергольного топлива на основе полиэтилена, содержащего NaBH<sub>4</sub>, и H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> было проведено в работах [46, 47]. В созданной авторами установке методом падения капли определялось влияние на время задержки воспламенения содержания NaBH4, концентрации H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, скорости соударения падающей капли с горючим, объема капли, давления, газовой среды. Наиболее сильно время задержки воспламенения зависит от концентрации H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> и содержания NaBH<sub>4</sub>. Например, оно уменьшается на 57% с увеличением концентрации Н2О2 от 85 до 93%. Наименьшее время задержки воспламенения составляло менее 3 мс, наибольшее — менее 10 мс, что совпадает с данными [44]. Отмечено, что атмосферный кислород играет незначительную роль в процессе реакции. В основном с горючим реагирует кислород, образующийся при разложении H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> [47]. Авторы считают, что эта комбинация окислителя и горючего может быть применена в качестве высокоэффективного, но дешевого и нетоксичного топлива для использования в гибридных двигателях. Кроме того, результаты также показывают необходимость включения динамики капель в исследование воспламенения гипергольных ракетных топлив.

Израильскими и китайскими исследователями разработан подход к синтезу и характеристике концептуально новых гипергольных с  $H_2O_2$ , не содержащих гидридов и бора и устойчивых к воздействию воздуха и влаги твердых горючих на основе комплексов Си и Со с лигандом — бис(5-тетразолил)амином ( $H_2BTA$ ). Из полученных и исследованных комплексов наиболее эффективно термостойкое до 343°С соединение [ $K_2(H_2O)_2Cu(BTA)$ ]<sub>n</sub>, время воспламенения которого при контакте с 97%-ным  $H_2O_2$  — 7 мс. Исследована взаимосвязь структуры и гипергольной активности комплексов [48].

Обычно в ракетных топливах используют пероксид водорода концентрацией более 85% [1, 3]. Для длительного хранения такого H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> требуются особые условия. Более стабилен 70%-ный H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>. S. Rang с сотр. исследовали возможность использования такого H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> для гибридного двигателя с твердым горючим [49], в качестве которого использовали полибутадиен с концевыми гидроксильными группами, полиэтилен или парафиновый воск, содержащие аминоборан и катализатор разложения H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> — Pd/C (20% палладия на саже). Из исследованных десяти образцов топлива два показали очень малое время задержки воспламенения — 4.92 и 8.75 мс. Полученные результаты показывают возможность использования 70%-ного H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> при разработке ракетных топлив с использованием  $H_2O_2$ , но при этом удельный импульс такого топлива будет ниже, чем в случае H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> концентрацией выше 90%.

В статье [50] также показана возможность использования 70%-ного H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> в гибридных топливах. Но в этом случае окислитель представлял собой раствор [NH<sub>3</sub>OH]<sup>+</sup>[NO<sub>3</sub>]<sup>-</sup> в 70%-ном H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>. Температура замерзания такого окислителя ниже минус 40°С. Горючим служили сложные ионные соединения с катионами на основе производных ферроцена и анионами из комплексных соединений марганца и железа с тетразолами. Одно из горючих показало малое время задержки воспламенения, составляющее 4 мс даже при температуре минус 40°С.

## Гипергольные топлива для гибридного двигателя с пакетом катализатора разложения пероксида водорода

Эксперименты по разложению высококонцентрированного H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> на катализаторах показали, что температура образующегося парогаза может достигать 1000 К и выше в зависимости от типа катализатора, его геометрической формы и размера пакета катализатора, а также от концентрации  $H_2O_2$  [51]. Например, при разложении 90%-ного  $H_2O_2$  на серебряной сетке температура продуктов разложения находится в интервале 726–941 К [52], а в случае 95%-ного  $H_2O_2$ максимальная температура составляет 1140 К [53]. При таких температурах продуктов разложения твердое углеводородное горючее в гибридных двигателях уже способно самовоспламеняться [52–55].

В 2017 г. было опубликовано сообщение о разработке упрощенного гибридного двигателя для использования в низковысотном полете [54]. Топливная система состояла из гранул полиэтилена и 90%-ного  $H_2O_2$ . В этом случае на полиэтилен действовали потоком продуктов разложения  $H_2O_2$  на катализаторе  $MnO_2/Al_2O_3$ . Адиабатическая температура продуктов разложения  $H_2O_2$  составляла 749°С, и такой температуры было достаточно, чтобы происходило самовоспламенение таких полимеров, как полиметилметакрилат, полиэтилен, полибутадиен с концевыми гидроксильными группами.

Проведено комбинированное теоретическое и экспериментальное исследование воспламенения и сгорания гибридного топлива на основе парафина и 90%-ного H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, разлагаемого на пакете серебряного катализатора [55]. На воспламенение и эффективность сгорания влияют предварительный нагрев, размер ячеек в серебряной сетке, количество слоев серебряной сетки. Предварительно нагретый 60-слойный пакет серебряного катализатора обеспечивал наилучшие показатели разложения, включая наименьшее время задержки каталитического разложения и высочайшую эффективность разложения. Результаты показали, что производительность каталитического слоя была стабильной, в то время как процесс повторного воспламенения происходил быстро, без пика давления. Для гибридной топливной пары 90%-ный H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>-полиэтилен задержка воспламенения зависела от температуры продуктов разложения H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, которая в свою очередь зависела от высоты слоя катализатора и расхода окислителя [52].

Z. Guo и сотр. [53] исследовали в лабораторном гибридном двигателе процесс воспламенения и горения гибридного топлива на основе 95%-ного H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> и полибутадиена с концевыми гидроксильными группами, в который были введены добавки алюминия для повышения удельного импульса. Для разложения H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> использовался пакет серебряного катализатора. Введение алюминия существенно увеличивает время задержки воспламенения, которая при содержании 38% Al составляла 0.250 с, а при 65% Al — 0.556 с.

## Гипергольные топлива на основе пероксида водорода и ионных жидкостей

Жидкие и легкоплавкие ракетные горючие на основе ионных жидкостей характеризуются такими свойствами, как чрезвычайно низкое давление пара, низкая токсичность и простота в обращении с ними при энергетической эффективности на уровне гидразина [56–60]. Энергетические ионные жидкости широко исследуются также в качестве гипергольного нетоксичного горючего в паре с экологически чистым и нетоксичным окислителем — высококонцентрированным H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> для замены обычных двухкомпонентных топлив на основе гидразина и азотной кислоты. Физико-химические свойства и энергетическая эффективность некоторых из этих ионных жидкостей рассмотрены в работах [59, 60], однако их гипергольность рассматривается в основном при контакте с 97-98%-ной HNO<sub>3</sub> или с N<sub>2</sub>O<sub>4</sub>. Строго говоря, такие топлива нельзя отнести к малотоксичным «зеленым» топливам из-за высокой химической опасности и токсичности этих окислителей.

Наиболее активно исследуют в качестве гипергольных горючих в паре с пероксидом водорода производные имидазола, различные аминобораны, каркасные ионные жидкости, такие как азолы, бораны и др., которые наряду с гипергольными свойствами способны обеспечить сравнительно удовлетворительный удельный импульс. Российскими учеными был предложен новый класс гипергольных с H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> энергетических горючих — ионных жидкостей, содержащих 1,2,5-оксадиазольное кольцо и анионы — ¬NO<sub>2</sub>, ¬N(CN)<sub>2</sub>, ¬N(NO<sub>2</sub>). Соединения обладают хорошей термостабильностью (до 219°С) и сравнительно высокой плотностью (1.21–1.47 г·см<sup>-3</sup>) [61].

F. Lauck. и др. провели теоретический отбор ионных жидкостей, пригодных для разработки «зеленого» топлива с H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> [58, 62-64]. Выбор проводился с учетом коммерческой доступности, плотности, температуры плавления, вязкости и теоретического расчета удельного импульса. В результате для дальнейшего исследования был выбран ацетат 1-бутил-3-метилимидазолия. Поскольку эта ионная жидкость не воспламеняется при контакте с H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, пришлось в него вводить в качестве катализатора соли переходных металлов. Время задержки воспламенения составляло более 100 мс. Как показывают последние исследования, наименьшим временем задержки воспламенения из ионных жидкостей отличаются имидазолийтиоцианат и 1-этил-3-метилимидазолийтиоцианат, но при контакте с 97%-ным Н<sub>2</sub>O<sub>2</sub> [65, 66] (табл. 4). Смешением 35% твердого при комнатной температуре имидазолийтиоцианата и 65% жидкого 1-этил-3-метилимидазолийтиоцианата авторы получили маслообразное горючее, время задержки воспламенения которого составило 16.7 мс. Удельный массовый импульс этого горючего с 98%-ным H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> — 314 с, а объемный — 429 с, в то время как для пары монометилгидразин-тетраоксид азота — 337 с и 392 с соответственно.

К недостаткам ионных жидкостей следует отнести большое время задержки воспламенения. Например, для наиболее часто используемых в последних работах ионных жидкостей — 1-этил-3-метилимидазолийцианборгидрида и 1-этил-3-метилимидазолийтиоцианата время задержки с 96–97%-ным H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> составляет около 30 мс. При уменьшении концентрации H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> задержка воспламенения резко возрастает и может составлять 5 с для 70%-ного H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>.

Это обстоятельство заставило исследователей проводить поиск как новых ионных жидкостей с приемлемым временем задержки воспламенения, так и катализаторов и промоторов, позволяющих снизить время воспламенения. Сочетание в ионных жидкостях разных активных с  $H_2O_2$  катионов и богатых горючим анионов, которые могут быть и катализаторами разложения  $H_2O_2$ , открывает путь к синтезу новых ионных жидкостей с приемлемыми временем задержки воспламенения, физико-механическими свойствами и энергетическими характеристиками. Кроме того, удовлетворительные результаты могут быть получены и смешением двух ионных жидкостей [40, 65, 66] (табл. 4).

Из каталитических добавок хорошие результаты были получены с добавкой иода [67], NaI [41], комплексов тиоцианата меди [63], ионных жидкостей с анионами иодкупратов [Cu<sub>4</sub>I<sub>8</sub><sup>4–</sup>], [Cu<sub>8</sub>I<sub>14</sub><sup>6–</sup>], [Cu<sub>3</sub>I<sub>7</sub><sup>2–</sup>], [CuI<sub>2</sub><sup>-</sup>]<sub>n</sub> [68], комплексов меди с имидазолийцианборгидридом [69]. Собственное время задержки воспламенения последних составляет 3.75-8.5 мс. Представляют интерес промоторы на основе ферроценилиодкупратов, содержащих реакционные с H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> анионы и катионы, добавка которых к ионным жидкостям обеспечивает низкотемпературное гипергольное воспламенение [70], а также богатые иодом и бором промоторы, среди которых наиболее эффективно соединение  $[FcCH_2NEtMe_2^+]_2[B_{12}I_{12}^{2-}]$ (Fc — ферроценил, C<sub>10</sub>H<sub>9</sub>Fe). Даже с 70%-ным H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> время задержки воспламенения составило 45 мс. Эти результаты показывают возможность создания гипергольного ракетного топлива с более доступным 85%-ным Н<sub>2</sub>О<sub>2</sub>.

Довольно активны промоторы на основе комплексов меди, марганца и никеля с этилимидазолийцианборгидридом и этилимидазолийдицианамидом [75, 76]. Синтезированы хорошо растворимые в коммерчески доступных ионных жидкостях — 1-аллил-3-метилимидазолийдицианамиде и 1-бутил-3-метилимидазолийдицианамиде дифункциональные промоторы на основе комплексов, в которых анион содержит переходные металлы, а катион — замещенный гидрид бора [77]. Горючие, содержащие эти промоторы, имеют высокую плотность, приемлемую вязкость и высокую термостабильность. Время задержки воспламенения горючего — 34.0 мс.

Синтезированы, но не исследованы в качестве улучшающих воспламенение добавок к ионным жидкостям весьма активные комплексы меди и кобальта с лигандом бис(тетразолил)амином, устойчивые к воздействию воздуха и влаги, и комплексы меди, никеля и марганца с аллилимидазолом и этилимидазолом [48, 78]. Комплексы Cu(AIM)<sub>4</sub>Cl<sub>2</sub>, Cu(AIM)<sub>4</sub>(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>, Cu(EIM)<sub>4</sub>(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>(H<sub>2</sub>O)<sub>2</sub>, Ni(AIM)<sub>4</sub>(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> и Mn(AIM)<sub>4</sub>(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> (AIM — 1-аллилимидазол и EIM —1-этилимидазол) показали высокую гипергольность с 90%-ным H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>. Наименьшее время задержки воспламенения составило всего 3 мс в случае комплекса Cu(AIM)<sub>4</sub>(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>. Это сверхкороткое время задержки воспламенения было меньше, чем в случае большинства гипергольных комбинаций, и объяснялось синергией между различными компонентами энергетических комплексов. Температуры разложения этих соединений составляют 228.8-295.5°С. Самая высокая термостойкость наблюдалась у комплекса Mn(AIM)<sub>4</sub>(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>. Плотность этих соединений составляет от 1.389 до 1.502 г·см<sup>-3</sup>, что выше, чем плотность большинства известных гипергольных горючих [79].

Улучшить воспламенение при контакте H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> с ионными жидкостями можно не только за счет добавок к ионным жидкостям, но и введением некоторых неорганических нитратов в  $H_2O_2$ . V. Weiser др. [80] предложили использовать H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (концентрация 60-94%) с растворенными в нем  $NH_4NO_3$ ,  $NH_4N(NO_2)_2$  и комплексом H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> и мочевины (пероксид карбамида). Эти добавки вводили для снижения температуры плавления или стеклования и повышения стабильности H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, а также для улучшения кислородного баланса и производительности. Такие окислители обеспечивают низкие рабочие температуры — намного ниже минус 40°С. В сочетании с высокоэнергетической ионной жидкостью 1-этил-3-метилимидазолонийдицианамидом в качестве горючего такая система обеспечивает теоретический удельный импульс около 2600 H·c<sup>-1</sup>·кг<sup>-1</sup>, или 3750 H·c<sup>-1</sup>·дм<sup>-3</sup>, и может использоваться в качестве жидкого или гелеобразного топлива. При проведении лабораторных испытаний

4
аблица
[

	Горючее	С'П	Danie normanie noo	
ионная жидкость	промотор или катализатор (концентрация, мас%)		пламенения, мс	источник источник
[Имидазолий][тиоцианат]	Orcytctbyet	97	7.3	[65, 66]
[1-Этил-3-метилимидазолий][тиоцианат]	Отсутствует	97	29.3	1
35% имидазолийтиоцианат + 65% этилметилими-	Отсутствует	97	16.7	
дазолийтиоцианат				
1-Этил-3-метилимидазолийтиоцианат	CuSCN (1)	97	7.8	[63, 71]
1-Этил-3-метилимидазолийтиоцианат	CuSCN (5)	97	4.9	
1-Бутил-3- метилимидазолийтиоцианат	Отсутствует	96	45	[64]
1-Этил-3-метилимидазолийтиоцианат	OTCyTCTByeT	96	31.7	[64]
1-Этил-3-метилимидазолийтиоцианат	CuSCN (5)	96	13.9	[64]
1-Этил-3-метилимидазолийтиоцианат	CuSCN (5)	96	15	[72]
1-Этил-3-метилимидазолийцианборгидрид	Orcytctbyer	95	500	[41]
1-Этил-3-метилимидазолийцианборгидрид	Nal (9)	95	75	
1-Этил-3-метилимидазолийцианборгидрид	1-Этил-3-метилимидазолий [Cu4I8] (10)	95	24	[68]
1-Этил-3-метилимидазолийцианборгидрид	Отсутствует	95	1000	[69]
1-Этил-3-метилимидазолийцианборгидрид	[Cu <sup>II</sup> (Имидазолий)-(цианборгидрид)] (13)	95	9.5	
1-Этил-3-метилимидазолийцианборгидрид	Orcytctbyer	70	5000	
1-Этил-3-метилимидазолийцианборгидрид	[Cu <sup>II</sup> (Имидазолий)-(цианборгидрид)] (13)	70	21.25	
[1-Этил-3-метилимидазолий][BH <sub>3</sub> CN] + тетра- глим (1·1)	Сu <sup>II</sup> (Имидазолий)-(цианборгидрид)] (13)	90	7.75	
[1-Этил-3-метилимидазолий][BH <sub>3</sub> CN] + тетра- глим (1:1)	[Сu <sup>II</sup> (Имидазолий)-(цианборгидрид)] (13)	70	16.5	
[1-Этил-3-метилимидазолий][BH <sub>3</sub> CN]	[Ферроценилметилентриметиламмоний][Cul <sup>-</sup> ] (10)	95	31 (при н. у.)	[20]
[1-Этил-3-метилимидазолий ][BH <sub>3</sub> CN]	[Ферроценилметилентриметиламмоний][Cul-] (10)	70	66 (при минус 40°С) 58	
Cu <sup>II</sup> (1-Н-имидазол)4(BH <sub>3</sub> CN)][BH <sub>3</sub> CN]	Отсутствует	95	12	[73]
[1-Этил-3-метилимидазолий][BH <sub>3</sub> CN]	Опсутствует	95	4000	[74]
[1-Этил-3-метилимидазолий][BH <sub>3</sub> CN]	[Ферроценилметилендиметилэтиламмоний][В <sub>12</sub> I <sub>12</sub> <sup>2-</sup> ] (8)	95	17	
[1-Этил-3-метилимидазолий][BH <sub>3</sub> CN]	Отсутствует	70	30000	
[1-Этил-3-метилимидазолий][BH <sub>3</sub> CN]	[Ферроценилметилендиметилэтиламмоний][В <sub>12</sub> I <sub>12</sub> <sup>2-</sup> ] (8)	70	45	

Время задержки воспламенения ионных жидкостей с добавкой катализаторов и промоторов

	Горючее		David	Π
ионная жидкость	промотор или катализатор (концентрация, мас%)	<sup>112</sup> O2, %	ремя задержки вос- пламенения, мс	литературным источник
[1-Этил-3-метилимидазолий][ВН <sub>3</sub> CN]	Комплекс Си и [этилимидазолий] <sub>4</sub> [BH <sub>3</sub> CN] <sub>2</sub> (10) Комплекс Ni и [этилимидазолий] <sub>4</sub> [N(CN) <sub>2</sub> ] (10)	90 90	104 94	[75, 76]
[1-Этил-3-метилимидазолий][ВН₄]*	$[1,3-Диметилимидазолий]_n[Cu_2l_3]_n (15)$	95	13	[63]
Ацетат 1-бутил-3-метилимидазолия	Ацетат Си		>100	[58]
[1-Этил-3-метилимидазолий][ВН4] + метилими- дазолийборан (1:1)	Отсутствует	95	35	[40]
[Метилимидазолий][ВН3]	[1-Этил-3-метилимидазолий][Сu4I8] (10)	95	10	[68]
[Метилимидазолий][BH <sub>3</sub> ]	NaI (3)	95	25	[41]
$[C_2N_3^+][BH_2CN^-]$	I <sub>2</sub>	90	Легко воспламеняется	[67]
* Ионная жидкость с добавкой приведенного п	промотора остается гомогенной при температуре минус 4(	0°C.	•	

$\odot$
õ
Ò
4
$\mathbf{O}$
$\geq$
H
И
Σ
40
×.
5
5
5
þ
O.
E
Σ
e o
H
И
ā
E
.=
ž
2
Ξ
H
é
E
¥
1
2
5
2
5
ğ
Ĥ
S
0
đ
ä
5
Ē
Õ
Z
ō
d
E
~
2
5
Ħ
Ŧ
5
Ĕ
Ð
ñ
И
þ
1
Ĵ,
¥
8
a
Õ
0
Ħ
S
Р
H
Ö
9
Ě
5
E
×
-
32
H
Ξ
T

Таблица 4. Продолжение

было получено время задержки воспламенения от 15 до 200 мс.

S. Park и сотр. исследовали влияние добавок LiNO<sub>3</sub> и NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub> к H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> концентрацией 60–95% на его физические свойства и эффективность гипергольного воспламенения при контакте с ионными жидкостями — 1-этил-3-метилимидазолийтиоцианатом и 1-бутил-3-метилимидазолийтиоцианатом [81]. Добавка этих нитратов к 90- и 95%-ному H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> снижает температуру его замерзания до минус 30°С и повышает эффективность воспламенения исследуемых ионных жидкостей. При этом добавка LiNO<sub>3</sub> оказала значительно большее влияние на повышение эффективности воспламенения, чем добавка NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>. Самовоспламенение наблюдалось также в случае 60%-ного H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> с добавкой нитрата лития.

#### Заключение

Анализ литературы показывает, что за последние 5 лет интерес к разработке малотоксичных гипергольных ракетных топлив, в которых окислителем является высококонцентрированный пероксид водорода, не ослабевает. Топлива предназначены для использования в жидкостных и гибридных маневровых орбитальных двигателях. Основные усилия разработчиков направлены на поиск новых высокоэнергетических горючих, которые при контакте с пероксидом водорода воспламеняются с минимальным временем задержки воспламенения и в то же время должны обеспечить создание топлив с высоким удельным импульсом, устойчивым горением и с максимальной полнотой сгорания.

Наиболее заманчивой и вместе с тем весьма трудной задачей является создание гипергольного топлива для жидкостного ракетного двигателя на основе штатных жидких углеводородных горючих типа керосина и высококонцентрированного пероксида водорода. Оба компонента имеют широкую сырьевую базу, низкую токсичность, при их использовании повышается безопасность хранения и эксплуатации топлива на стартовой площадке. Гипергольность топлива обеспечивается за счет введения в горючее каталитических или активных добавок, при взаимодействии которых с Н<sub>2</sub>O<sub>2</sub> происходит экзотермическая реакция, в результате чего горючее воспламеняется. Нерастворимость подавляющего большинства каталитических и активирующих добавок в углеводородах привела к необходимости разработки гипергольных гелеобразных и твердых горючих, содержащих такие добавки, среди которых предпочтительны NaBH<sub>4</sub> и катализаторы на основе солей марганца и меди, которые обеспечивают наименьшее время задержки воспламенения. В последние годы резко возрос интерес к использованию в качестве горючего ионных жидкостей, анионы и катионы в которых могут быть как катализаторами разложения пероксида водорода, так и активными добавками. Однако время задержки воспламенения их велико, поэтому ведутся исследования по разработке промоторов, устраняющих этот недостаток. Эксперименты показали, что удовлетворительное время задержки воспламенения наблюдалось в случае использования в качестве промоторов комплексов меди с имидазолийцианборгидридом, а также CuSCN.

#### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

#### Информация о вкладе авторов

Ш. Л. Гусейнов написал разделы «Введение» и «Заключение», провел сбор литературы и сделал анализ литературы по гипергольным гибридным ракетным топливам на основе твердого горючего с каталитическими и активными добавками и  $H_2O_2$ , а также по топливам для гибридного двигателя с пакетом катализатора разложения  $H_2O_2$ ; С. Г. Федоров провел поиск литературы о гипергольных топливах на основе  $H_2O_2$  и ионных жидкостей, осуществил их анализ и обобщение; В. А. Косых — поиск литературы о гипергольных топливах для жидкостного реактивного двигателя, проанализировал данные и провел систематизацию; В. А. Ваулин — поиск и анализ литературы о гелеобразных горючих, гипергольных с  $H_2O_2$ .

#### Информация об авторах

*Гусейнов Ширин Латифович*, д.т.н. ORCID:https://orcid.org/0000-0002-3578-7216 *Федоров Станислав Георгиевич*, к.х.н. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3689-3520 *Косых Виталий Андреевич*, к.т.н. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6478-652x *Ваулин Владимир Александрович* 

ORCID: https://orcid.org/0009-0002-3755-4560

### Список литературы

- Davis S. M., Yilmaz N. Advances in hypergolic propellants: Ignition, hydrazine, and hydrogen peroxide research // Advances in Aerospace Engineering. 2014. ID 729313. https://doi.org/10.1155/2014/729313
- [2] *Florczuk W., Rarata G.* Assessment of various fuel additives for reliable hypergolic ignition with 98% + HTP // Proceedings of the 66th Int. Astronautical Congress. 2015. ID IAC-15-C4.3.9. https://www.researchgate.net/publication/301285592
- [3] Florczuk W., Rarata G. Performance evaluation of the hypergolic green propellants based on the HTP for a future next generation spacecrafts // 53rd AIAA/ SAE/ASEE Joint Propul. Conf., AIAA Propul. and Energy Forum. American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2017. AIAA. ID 2017–4849. https://doi.org/10.2514/6.2017-4849
- [4] Гусейнов Ш. Л., Федоров С. Г., Косых В. А., Стороженко П. А. Гипергольные ракетные топлива на основе пероксида водорода и органических соединений: исторический аспект и современное состояние // Изв. АН. Сер. хим. 2018. Т. 67. № 11. С. 1943–1954 [Guseinov Sh. L., Fedorov S. G., Kosykh V. A., Storozhenko P. A. Hypergolic propellants based on hydrogen peroxide and organic compounds: Historical aspect and current state // Russ. Chem. Bull. 2018. V. 67. N 11. P. 1–12.

https://doi.org/10.1007/s11172-018-2314-1].

[5] *Türker Lemi*. Hypergolic systems based on hydrogen peroxide oxidizer // Earthline J. Chem. Sci. 2023. V. 10. N 1. P. 1–42.

https://doi.org/10.34198/ejcs.10123.142

- [6] Козлов А. А., Боровик И. Н., Ермашкевич А. А., Ташев В. П., Гусейнов Ш. Л., Косых В. А. Исследование процесса самовоспламенения топлива, состоящего из высококонцентрированной перекиси водорода, керосина и пирофорных добавок // Вестн. машиностроения. 2019. № 12. С. 45– 49 [Kozlov A. A., Borovik I., Ermashkevich A. A., Tashev V. P., Guseinov Sh. L., Kosykh V. A. Selfignition of fuel consisting of hydrogen peroxide, kerosene, and pyrophoric additives // Russ. Eng. Res. 2020. V. 40. N 3. P. 208–213. https://doi.org/10.3103/S1068798X20030107].
- [7] Yuan T., Chen K., Huang B. Semi-hypergolic kerosene/hydrogen peroxide fuel system and its autoignition injector design // 51st AIAA/SAE/ASEE Joint Propul. Conf., July 2015. AIAA. ID 2015–3847. https://doi.org/10.2514/6.2015-3847
- [8] Пат. RU 2638989 (опубл. 2017). Гипергольное ракетное топливо.
- [9] Mayer A., Wieling W. Green propulsion research at TNO the Netherlands // Trans. Aerospace Res. 2018. V. 4. P. 7–30. https://doi.org/10.2478/TAR-2018-0026

- [10] Mashio L. J., Pereira L. G., Meyer W. M., Marques R., Vieira R. A DOE study on the hypergolicity of hydrogen peroxide with a rocket liquid fuel based on monoethanolamine and ethanol // Int. J. Energetic Mater. Chem. Propul. 2018. V. 17. N 2. P. 37–145. https://doi.org/10.1615/IntJEnergeticMaterialsChem Prop.2018029025
- [11] Maschio L. J., de Araújo E. P., Pereira L. G., Gouvêa L. H., Vieira R. Assessing the performance of a green liquid fuel hypergolic with hydrogen peroxide in a 50n bipropellant thruster // Int. J. Energetic Mater. Chem. Propul. 2021. V. 20. N 1. P. 21–30. https:// doi.org/10.1615/IntJEnergeticMaterialsChemPr op.2020032684
- [12] Kim K.-S., Bhosale V.K., Kwon S. Synergistic effect of a hybrid additive for hydrogen peroxide-based low toxicity hypergolic propellants // Combust. Flame. 2021. V. 231. ID 111450. https://doi.org/10.1016/j. combustflame.2021.111450
- [13] Mota F., Fei L., Tang Ch., Huang Z., Costa F. Hypergolic ignition behaviors of green propellants with hydrogen peroxide: The TMEDA/DMEA system // Fuel. 2023. V. 336. N 15. ID 127086. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.127086
- [14] Kang H., Kwon S. Green hypergolic combination: Diethylenetriamine-based fuel and hydrogen peroxide // Acta Austronautica. 2017. V. 137. P. 25–30. https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2017.04.009
- [15] Kang H., Won J., Baek S., Wook K. S. Autoignition and combustion characteristics of sodium borohydridebased non-toxic hypergolic fuel droplet at elevated temperatures // Combust. Flame. 2017. V. 181. P. 149– 156.

https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2017.03.021

[16] Kang H., Park S., Park Y., Lee J. Ignition-delay measurement for drop test with hypergolic propellants: Reactive fuels and hydrogen peroxide // Combust. Flame. 2020. V. 217. N 2. P. 306–313. https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2020.04.017

https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2020.04.017

- [17] Naseem M. S., Jyoti B. V. S., Baek S. W., Lee H. J., Cho S. J. Hypergolic studies of ethanol based gelled bi-propellant system for propulsion application // Propellants, Explosives, Pyrotechnics. 2017. V. 42. N 6. P. 676–682. https://doi.org/10.1002/prep.201700046
- [18] *Rarata G., Florczuk W.* Novel liquid compounds as hypergolic propellants with HTP // J. KONES Powertrain Transport. 2016. V. 23. P. 271–278.
- https://doi.org/10.5604/12314005.1213587
  [19] Kapusta L. J., Boruc L., Kindracki J. Pressure and temperature effect on hypergolic ignition delay of triglyme-based fuel with hydrogen peroxide // Fuel. 2021. V. 287. N 1. ID 119370. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.119370
- [20] Zhang D., Yu D., Yuan Y., Zhang P., Fan X. Hypergolic ignition induced by head-on collision of bi-propellant

droplets: Monoethanolamine-based fuel and hydrogen peroxide // Fuel. 2023. V. 342. ID 127788. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.127788

[21] Kim K.-S., Jung S., Kwon S. Optical visualization of hypergolic burning spray structure using blue light spectrum // Acta Astronautica. 2022. V. 193. P. 230–236.

https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2022.01.007

- [22] Ricker S., Kurilov M., Freudenmann D., Kirchberger Ch., Hertel T., Ciezki H., Schlechtriem S. Novel gelled fuels containing nanoparticles as hypergolic bipropellants with HTP // 8th European Conf. for Aeronautics and Space Sciences (EUCASS). Madrid, 2019. Project: Green Rocket Propellants. https://doi.org/:10.13009/EUCASS2019-242
- [23] Kurilov M., Kirchberger C., Freuenman D., Stiefel A., Ciezki H. A method for screening and identification of green hypergolic bipropellants // Int. J. Energetic Mater. Chem. Propul. 2018. V. 17. N 3. P. 183–203. https://doi.org/10.1615/IntJEnergeticMaterialsChemP rop.2018028057
- [24] Connell T. L., Jr., Risha G. A., Yetter R. A., Natan B. Effect of fuel type on hypergolic ignition of hydrogen peroxide with gelled hydrocarbon // Fuel 50th AIAA/ ASME/SAE/ASEE Joint Propul. Conf. 2014. AIAA. ID 2014-3470. https://doi.org/10.2514/6.2014-3470
- [25] Connell T. L., Jr., Risha G. A., Yetter R. A., Natan B. Multi-injector impinging jet studies of ignition delay for hydrogen peroxide and gelled hydrocarbon fuel containing reactive or catalytic particles // 51st AIAA/SAE/ASEE Joint Propul. Conf., 2015. AIAA. ID 2015-3972. https://doi.org/10.2514/6.2015-3972
- [26] Connell T. L., Jr., Risha G. A., Yetter R. A., Natan B. Hypergolic ignition of hydrogen peroxide/gel fuel impinging jets // J. Propul. Power. 2018. V. 34. N 1. P. 182–188. https://doi.org/10.2514/1.B36571
- [27] Connell T. L., Jr., Risha G. A., Yetter R. A., Natan B. Investigation of gel hydrocarbon fuels and hydrogen peroxide as a hypergolic bipropellant // Int. J. Energetic Mater. Chem. Propul. 2018. V. 17. N 1. P. 57–73. https://doi.org/10.1615/IntJEnergeticMater ialsChemProp.2018024419
- [28] Connell T. L., Jr., Risha G. A., Yetter R. A., Natan B. Ignition of hydrogen peroxide with gel hydrocarbon fuels // J. Propul. Power. 2018. V. 34. N 1. P. 170–182. https://doi.org/10.2514/1.B36458
- [29] Goldin R., Nath S. Hypergolic ignition of a kerosenebased gel fuel with hydrogen peroxide in rocket motors // Int. J. Energetic Mater. Chem. Propul. 2024. V. 23. N 2. P. 67–78. https://doi.org/10.1615/IntJEner geticMaterialsChemProp.2023051032
- [30] Natan B., Perteghella V., Solomon Y. Hypergolic ignition of oxidizers and fuels by fuel gelation and suspension of reactive or catalyst particles // 46th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propul. Conf. and

Exhibit. 2010. 25–28 July, Nashville, TN. AIAA. ID 2010-7144. https://doi.org/10.2514/6.2010-7144

- [31] Natan B., Solomon Y., Perteghella V. Hypergolic ignition by fuel gellation and suspension of reactive or catalyst particles // J. Propul. Power. 2011. V. 27. N 5. P. 1145–1148. https://doi.org/10.2514/1.B34130
- [32] Natan B., Hasan Dov. Advances in gel propulsion // Int. J. Energetic Mater. Chem. Propul. 2019. V. 18. N 4. P. 303–323. https://doi.org/10.1615/IntJEnerget icMaterialsChemProp.2019028375
- [33] Hasan D., Grinstein D., Kuznetsov A., Natan B., Schlagman Z., Habibi A., Elyashiv M. Green comparable alternatives of hydrazines-based monopropellant and bipropellant rocket systems // Aerospace Engineering [Working Title]. 2019. Chapter 1. Publ. by IntechOpen. Am. University of Cyprus / Editor G. Dekouls. https://doi.org/10.5772/intechopen.82676
- [34] Pat. US 11242295 (publ. 2022). Hypergolic system.
- [35] Kirchberger Ch., Kurilov M., Stiefel A., Freudenmann D., Ciezki H. Investigation on rheology, spray and combustion for processes of gelled propellants at DLR Lampoldshausen // 8th Conf. for Aeronautics and Space Sciences EUCASS, 2019. https://doi.org/10.13009/EUCASS2019-733
- [36] Kirchberger Ch., Freudenmann D., Ciezki H. Influence of propellant composition on the performance of a gel rocket combustion chamber // Conference: AIAA Propul. and Energy 2019 Forum. Session: Green Propul. Systems for Space Applications II. Published Online:16 Aug. 2019. AIAA. ID 2019–4428. https://doi.org/10.2514/6.2019-4428
- [37] Okinski A., Surmac P., Bartkowiak B., Mayer T., Sobczak K., Pakos M., Kaniewski D., Matyszewsk J., Rarata G., Wolanski P. Development of green storable hybrid rocket propulsion technology using 98% hydrogen peroxide as oxidizer // Aerospace. 2021. V. 8. N 9. P. 234–257. https://doi.org/10.3390/ aerospace8090234mailto:please\_login
- [38] John J., Nandagopalan P., Baek S. W., Cho S. J. Hypergolic ignition delay studies of solidified ethanol fuel with hydrogen peroxide for hybrid rockets // Combust. Flame. 2019. V. 212 (C). P. 205–215. https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2019.10.029
- [39] Jeong J., Bhosale V. K. Kwon S. Ultrafast igniting, low toxicity hypergolic hybrid solid fuels and hydrogen peroxide oxidizer // Fuel. 2021. V. 286. ID 119307. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.119307
- [40] Bhosale V. K., Jeong J., Kwon S. Ignition of boronbased green hypergolic fuels with hydrogen peroxide // Fuel. 2019. V. 255. N 1. ID 115729. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.115729
- [41] Bhosale V. K., Kim K.-S., Kwon S., Churchill D. G. Sodium iodide: A trigger for hypergolic ignition of non-toxic fuels with hydrogen peroxide // Session:

Green and Non-Toxic Propellants II. 2020. AIAA. ID 2020–3824. https://doi.org/10.2514/6.2020-3824

- [42] Jeong J., Rang S., Ugolini V. M. P., Kwon S. Hypergolicity improvement by activated carbonsupported catalysts for hydrogen peroxide oxidizer // Acta Astronautica. 2022. V. 198. P. 720–727. https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2022.06.011
- [43] Jeong J., Bhosale V.K., Kwon S. Demonstration of ammonia borane-based hypergolic ignitor for hybrid rocket // Acta Austranautica. 2022. V. 196. P. 85–93. https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2022.04.009
- [44] Castaneda D. A., Natan. B. Experimental investigation of the hydrogen peroxide-solid hydrocarbon hypergolic ignition // Acta Astronautica. 2019. V. 158. P. 286–295.
  - https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2018.05.058
- [45] Castaneda D. A., Natan B. Hypergolic ignition of hydrogen peroxide with various solid fuels // Fuel. 2022. V. 316. ID 123432. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.123432
- [46] Nath S., Laso I., Lefkowitz J. Parametric ignition study of a green hypergolic hybrid rocket fuel // Conference: AIAA SCITECH 2022 Forum. January 2022. AIAA. ID 2022–1484. https://doi.org/10.2514/6.2022-1484
- [47] Nath S., Laso I., Mallick L., Sobe Z., Koffler S., Blumer-Ganon B., Borzin E., Libis N., Lefkowitz J. K. Comprehensive ignition characterization of a nontoxic hypergolic hybrid rocket propellant // Proc. Combust. Inst. 2023. V. 39. N 3. P. 3361–3370. https://doi.org/10.1016/j.proci.2022.07.118
- [48] Das J., Shem-Tov D., Wang S., Zhang L., Flaxer E., Zhang S., Stierstorfer J., Wang K., Yan Q.-L. Dobrovetsky R., Gozin M. Hydride- and boron-free solid hypergolic H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>-ignitophores // Chem. Eng. J. 2021. V. 426. ID 131806. https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.131806
- [49] Rang S., Jeong J., Bhosale V. K. Reactivity of hypergolic hybrid solid fuel with industrial grade hydrogen peroxide // Fuel. 2022. V. 330. N 2. ID 125543. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.125543
- [50] Petrutik N., Kaminker I., Flaxer E., Shem-Tov D., Giladi T., Bar-Bechor Y., Das J., Gozin M. Janustype hypergolic fuels for hybrid systems using hydrogen peroxide and hydroxylammonium nitratebased oxidizers // Chem. Eng. J. 2023. V. 454. Part 2. ID 140170. https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.140170
- [51] Гусейнов Ш. Л., Федоров С. Г., Косых В. А., Стороженко П. А. Катализаторы разложения пероксида водорода, используемые в ракетных двигателях (обзор) // ЖПХ. 2020. Т. 93. № 4. С. 459– 482. https://doi.org/10.31857/S0044461820040015 [Guseinov Sh. L., Fedorov S. G., Kosykh V. A., Storozhenko P. A. Hydrogen peroxide decomposition catalysts used in rocket engines // Russ. J. Appl. Chem. 2020. V. 93. N 4. P. 467–465.

https://doi.org/10.1134/S1070427220040011].

- [52] Guo Z., Tiaan H., Yuanjun Z., Zhao S. Catalytic ignition delay investigation of hybrid rocket motor based on 90% hydrogen peroxide and polyethylene // 12th Int. Conf. on Mechanical and Aerospace Engineering (ICMAE). 2021, 16–19 July, Athens, Greece. https://doi.org/10.1109/ICMAE52228.2021.9522418
- [53] Guo Z., Tian H., Wang Z., Meng X., Cai G. Numerical and experimental study on 95% hydrogen peroxide catalytic ignition of hybrid rocket motor HTPB-based aluminum additive fuel // Acta Astronautica. 2022. V. 195. P. 98–108.

https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2022.03.004

- [54] Huh J., Ahn B., Kim Y., Song H., Yoon H., Kwon S. Development of a university-based simplified H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/ PE hybrid sounding rocket at KAIST // Int. J. Aeron. Space Sci. 2017. V. 18. N 3. P. 512–521. https://doi.org/10.5139/IJASS.2017.18.3.512
- [55] Wang Z., Lin X., Wu K., Zhang Z., Fang S., Meng D., Li F., Yu X. Charactering catalytic ignition and combustion for the ninety-percent hydrogen-peroxide/ paraffin-based hybrid rocket engine // J. Propul. Power. 2023. V. 39. N 5. https://doi.org/10.2514/1.B39045
- [56] Zhang Q., Shreeve J. Energetic ionic liquids as explosives and propellant fuels: A new journey of ionic liquid chemistry // Chem. Rev. 2014. V. 114. N 20. P. 10527–10574. https://doi.org/10.1021/cr500364t
- [57] Zhang Z., Zhao Z., Wang B., Zhang J. Boron based hypergolic ionic liquids: A review // Green Energy and the Environment. 2021. V. 6. N 6. P. 794–822. https://doi.org/10.1016/j.gee.2020.12.002
- [58] Lauck F, Negri M., Freudenmann D., Schlechtriem S. Selection of ionic liquids and characterization of hypergolicy with hydrogen peroxide // Int. J. Energetic Mater. Chem. Propul. 2020. V. 19. N 1. P. 25–37. https://doi.org/10.1615/IntJEnergeticMaterialsChem Prop.2019028004
- [59] Sam I., Gayathri S., Santhosh G., Cyriac J., Reshmi S. Exploring the possibilities of energetic ionic liquids as non-toxic hypergolic bipropellants in liquid rocket engines // J. Mol. Liq. 2022. V. 350. ID 118217. https://doi.org/10.1016/j.molliq.2021.118217
- [60] Jin Y., Zhang W., Zhou Z., Liu T., Xia H., Huang S., Zhang Q. Recent advances in hypergolic ionic liquids with broad potential for propellant applications // FirePhysChem. 2022. V. 2. N 3. P. 236–252. https://doi.org/10.1016/j.fpc.2022.04.001
- [61] Shaferov A. V., Arakelov S. T., Teslenko F. E., Pivkina A. N., Muravyev N. V., Fershtat L. First example of 1,2,5-oxadiazole-based hypergolic ionic liquids: A new class of potential energetic fuels // Chem. Eur. J. 2023. V.29. N 44. ID e202300948. https://doi.org/10.1002/chem.202300948
- [62] Lauck F., Negri M., Freudenman D. Study on hypergolic ignition of ionic liquid solutions. Conference // 8th Eur. Conf. for Aeronautics and

Space Sciences (EUCASS). 2019, Madrid, Spain. https://doi.org/10.13009/EUCASS2019-653

- [63] Negri M., Lauck F. Hot firing tests of a novel green hypergolic propellant in a thruster // J. Propul. Power. 2022. V. 38. N 1. https://doi.org/10.2514/1.B38413
- [64] Lauck F., Balkenhohl J., Negri M., Freudenmann D., Schlechtriem S. Green bipropellant development — A study on the hypergolicity of imidazole thiocyanate ionic liquids with hydrogen peroxide in an automated drop test setup // Combust. Flame. 2021. V. 226. P. 87–97. https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2020.11.033
- [65] Ricker S. C., Brüggemann D., Freudenmann D., Ricker R., Schlechtriem S. Protic thiocyanate ionic liquids as fuels for hypergolic bipropellants with hydrogen peroxide // Fuel. 2022. V. 328. ID 125290. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.125290
- [66] Ricker S. C., Freudenmann D., Schlechtriem S. Investigation on ionic liquid combinations as fuels for hypergolic propellants with hydrogen peroxide // 8th Ed. of the Space Propul. Conf. 2022, Estoril, Portugal. 09–13 May 2022. https://elib.dlr.de/190114/
- [67] Wang Z., Jin Y., Zhang W., Wang B., Liu T., Zhang J., Zhang Q. Synthesis and hypergolic properties of flammable ionic liquids based on the cyano (1H-1,2,3triazole-1-yl) dihydroborate anion // Dalton Trans. 2019. V. 48. N 18. P. 6198–6204. https://doi.org/10.1039/C9DT00958B
- [68] Wang K., Chinnam A., Petrutik N., Komarala E., Zhang Q., Yan Q-L., Dobrovetsky R., Gozin M. Iodocuprate-containing ionic liquids as promoters für green propulsion // J. Mater. Chem. A. 2018. V. 6. N 45. P. 22819–22829. https://doi.org/10.1039/C8TA08042A
- [69] Bhosale V. K., Gwak J., Kim Kyu-Seop, Churchill D. G., Lee Y., Kwon S. Rapid ignition of «green» bipropellants enlisting hypergolic copper (II) promoter-in-fuel // Fuel. 2021. V. 297. N 1. ID 120734. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.120734
- [70] Wang K., Liu T., Jin Y., Huang S., Petrutik N., Shem-Tov D., Yan Qi-Long, Gozin M., Zhang Q. Tandemaction ferrocenyl iodocuprates promoting low temperature hypergolic ignitions of «green» EIL– H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> bipropellants // J. Mater. Chem. A. 2020. V. 8. N 29. P. 14661–14670. https://doi.org/10.1039/D0TA04620E
- [71] Lauck F., Witte J., Negri M., Werling L., Schlechtriem S. Hypergolic ignition investigations with an impinging injector of an ionic liquid fuel with hydrogen peroxide. // 8th Ed. of the Space Propul. Conf. 2022, Estoril, Portugal. 09–13 May 2022. https://elib.dlr.de/187226/
- [72] *Stützer R. G., Balkenhohl J., Lauck F., Oschwald M., Schlechtriem S.* Hypergolic reaction between green ionic liquid EMIM SCN and hydrogen peroxide in lab-scale drop test chamber // Int. J. Energetic. Mater.

Chem. Propul. 2022. V. 21. N 1. P. 87–100. https:// doi.org/10.1615/IntJEnergeticMaterialsChemPr op.2021038219

[73] Wang Y.-J., Wang X.-Y., Xu H., Ren W.-W., Pang R., Yang L., Tong W.-Ch., Wang Q.-Y., Zang S.-Q. Onedimensional copper bromide based inorganic-organic hybrids as fuels for hypergolic bipropellants with hydrogen peroxide as oxidizer // Chem. Eng. J. 2023. V. 455. ID 140587.

https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.140587

- [74] Chinnam A., Petrutik N., Wang K., Shlomovich A., Shamis O., Tov D., Sućeska M., Yan Q.-L., Dobrovetsky R., Gozin M. Effects of closo-icosahedral periodoborane salts on hypergolic reactions of 70% H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> with energetic ionic liquids // J. Mater. Chem. A. 2018. V. 6. N 41. P. 19989–20006. https://doi.org/10.1039/C8TA03780A
- [75] Zhao X., Wang Z., Qi X., Song S., Huang S., Wang K., Zhang Q. Hunting for energetic complexes as hypergolic promoters for green propellants using hydrogen peroxide as oxidizer // Inorg. Chem. 2021. V. 60. N 22. P. 17033–17039. https://doi.org/10.1021/acs.inorgchem.1c02149
- [76] Zhao X., Wang J., Jin Y., Wang K., Zhang Q. Energetic complexes as promoters for the green hypergolic bipropellant of EIL-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> combinations // FirePhysChem. 2022. V. 2. N 2. P. 185–190. https://doi.org/10.1016/j.fpc.2021.11.006
- [77] Wang B., Wang Z., Jin Y., Wang K. Designing difunctional promoters for hypergolic ignitions of green bipropellants combining ionic liquids with H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> // Ind. Eng. Chem. Res. 2022. V. 61. N 48. P. 17433–17439. https://doi.org/10.1021/acs.iecr.2c03065
- [78] Li Z., Zhong Y., Liang L., Feng Y., Zhang J., Zhang T., Zhang Y. Hypergolic coordination compounds as modifiers for ionic liquid propulsion // Chem. Eng. J. 2021. V. 473. ID 110187. https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.130187
- [79] Wang K., Wang Z., Zhao X., Qi X., Song S., Jin Y., Zhang Qi. Unearthing hidden hypergolic potential of energetic complexes with hydrogen peroxide // Combust. Flame. 2022. V. 244. ID 112235. https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2022.112235
- [80] Weiser V., Hürttlen J., Schaller U., Imiolek A., Lity A., Kelzenberg S. Green liquid propellant oxidizers basing on solutions of ADN and an in commercial hydrogen peroxide for hypergolic propellants // 7th Eur. Conf. for Aeronautics and Space Sciences (EUCASS). 2016. https://doi.org/10.24406/publica-fhg-392433
- [81] Park S., Lee K., Kang H., Park Y., Lee J. Effects of oxidizing additives on the physical properties and ignition performance of hydrogen peroxide-based hypergolic propellants // Acta Astronautica. 2022. V. 200. P. 48–55.

https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2022.07.051