# ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ЭЛЕМЕНТНОГО СОСТАВА, ПЛОТНОСТИ И ЭНТАЛЬПИИ ОБРАЗОВАНИЯ ДИСПЕРГАТОРОВ ТВЕРДЫХ ТОПЛИВ НА ДАЛЬНОСТЬ ПОЛЕТА АТМОСФЕРНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

# © Д. Б. Лемперт<sup>1</sup>, В. В. Разносчиков<sup>1,2</sup>, Л. С. Яновский<sup>1,2,3</sup>

 Центральный институт авиационного моторостроения им. П. И. Баранова, 111116, г. Москва, ул. Авиамоторная, д. 2
<sup>2</sup> Институт проблем химической физики РАН, 142432, г. Черноголовка Московской обл., пр. Академика Семенова, д. 1
<sup>3</sup> Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, 119991, г. Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 51 E-mail: Lempert@icp.ac.ru

> Поступила в Редакцию 3 октября 2019 г. После доработки 8 октября 2019 г. Принята к публикации 8 октября 2019 г.

Рассмотрено около 50 композиций топлив на базе бора, углеводородного связующего и высокоэнтальпийного полиазотистого диспергатора. Изучена количественная зависимость достигаемой дальности полета оптимизированных топлив от элементного состава диспергатора, величины его энтальпии образования и плотности. Получены количественные показатели зависимости дальности полета от содержания каждого из входящих в состав диспергатора элементов и объяснены причины различий в величинах этих показателей. Получены эмпирические формулы, связывающие дальность полета с указанными характеристиками диспергатора, что позволяет предсказывать баллистическую эффективность диспергаторов (в том числе и не синтезированных к настоящему времени) с ошибкой не выше 1%.

Ключевые слова: твердое топливо; диспергатор; высокоэнтальпийные азотсодержащие соединения; метод наискорейшего спуска; элементный состав; энтальпия образования; плотность DOI: 10.1134/S0044461819120089

Совсем недавно было предложено использовать некоторые высокоэнтальпийные азот- и кислородсодержащие соединения в качестве диспергаторов твердых топлив для прямоточных воздушно-реактивных двигателей летательных аппаратов [1]. Было показано, что применение таких диспергаторов вместо перхлората аммония позволяет до 18% увеличить дальность полета. Были проведены расчеты по определению оптимальной композиции составов, содержащих связующее СКИ-3 (на основе полиизопрена), бор и диспергатор (исследовали 49 соединений), обеспечивающих достижение максимальной величины относительной дальности полета в атмосфере (по сравнению с топливами на базе перхлората аммония NH<sub>4</sub>ClO<sub>4</sub> как окислителя) летательного аппарата высокой дальности. В качестве двигателя для летательного аппарата рассматривался ракетно-прямоточный двигатель на твердом топливе, в котором протекает процесс газификации и диспергирования твердого топлива в газогенераторе без участия забортного воздуха, после чего газифицированные и диспергированные продукты этого процесса попадают в камеру дожигания, где полностью сгорают в потоке горячего воздуха [2-7]. Весь суммарный тепловой эффект такого двухкаскадного (двухступенчатого) горения является энергетической базой создания реактивной тяги. Экспериментальная отработка ракетно-прямоточного двигателя на твердом топливе применительно к борсодержащим топливным композициям показала, что для максимально возможного «выноса» твердого топлива из газогенератора и достижения максимально высокой скорости горения с высокой полнотой сгорания в камере дожигания требуется температура в газогенераторе не ниже 2000 К. Введение NH<sub>4</sub>ClO<sub>4</sub> в смесь углеводородного связующего с бором легко решает эту проблему — окисление компонентов перхлоратом аммония — весьма высокоэнергетический процесс. Однако, как было уже отмечено выше, дальность полета летательного аппарата в первую очередь зависит от суммарного (в двух камерах) тепловыделения в результате сгорания топлива. А эта величина является аддитивной по всем компонентам. Следовательно, поскольку индивидуальный NH<sub>4</sub>ClO<sub>4</sub> является чрезвычайно низкокалорийным топливом ( $Q = 3.1 \text{ МДж} \cdot \pi^{-1}$ , тогда как у каучука и бора Q = 38.8 и 137.9 МДж·л<sup>-1</sup> соответственно), введение NH<sub>4</sub>ClO<sub>4</sub> в топливную композицию заведомо снижает энергетический потенциал твердого топлива, хотя и обеспечивает осуществление газификации топлива. Введение в рецептуру вместо низкокалорийного NH<sub>4</sub>ClO<sub>4</sub> многих органических соединений, особенно высокоэнтальпийных, способных к экзотермическому превращению (в работе [1] величины  $\Delta H_{\rm f}^{\circ}$  таких диспергаторов достигают даже 5.7 кДж кг-1, а теплоты их сгорания — в диапазоне 12–31 МДж л<sup>-1</sup>) и (или) неполному окислению каучука, решает задачу повышения адиабатической температуры в газогенераторе до высоких величин и в то же время обеспечивает повышение общего тепловыделения при горении всей композиции в воздухе.

В работе [1] было показано, как зависит относительная дальность полета ( $L_{rel}$ ) (для топлив на базе перхлората аммония как диспергатора  $L_{rel} = 1$ ) оптимизированных композиций от плотности и энтальпии образования диспергатора (при прочих равных условиях), однако зависимость  $L_{rel}$  от элементного состава диспергатора не была установлена.

Найти такую закономерность было бы очень полезно с целью облегчить химикам-синтетикам поиск наиболее эффективных структур, чтобы сократить время на длительный, дорогостоящий и далеко не всегда успешный синтез множества новых компонентов. Поиску такой закономерности и посвящена настоящая статья.

#### Экспериментальная часть

Базой для анализа зависимости относительной дальности полета ( $L_{rel}$ ) от элементного состава диспергатора, его плотности и  $\Delta H_f^{\circ}$  для случая оптимальной композиции связующее (каучук СКИ-3) + бор + + диспергатор послужили данные, опубликованные в [1]. Эти данные были получены путем комплексного и многодисциплинарного анализа критерия эффективности сложной технической системы летательный аппарат–двигатель–топливо методами, опубликованными в [7–12]. Время расчета на компьютере с процессором Intel® Core<sup>TM</sup> i9-9900K оптимального по величине  $L_{rel}$  топливного состава, состоящего из трех компонентов, составляет 3–4 ч. Величины  $L_{rel}$ , рассчитанные этим методом, в настоящей работе авторы называют «рассчитанные классическим методом» [7, 11].

Следует отметить, что все полученные расчетные данные относятся к применению топлив со следующими ограничениями:

— содержание связующего (изучали изопреновый каучук СКИ-3; C<sub>5</sub>H<sub>8</sub>;  $\Delta H_{f^{\circ}} = -920 \text{ кДж} \cdot \text{кг}^{-1}$ ) не менее 30%,

— адиабатическая температура  $T_{\rm ad}$  не ниже 2000 К,

класс летательных аппаратов типа «Метеор»
[5].

Для других топлив и других типов летательных аппаратов с другими объемно-массовыми и аэродинамическими характеристиками результаты будут иными.

Полученные в [1] данные по достигаемым величинам  $L_{\rm rel}$  в оптимизированных композициях для всех 49 исследованных диспергаторов решено было представить как функцию от пяти аргументов, характеризующих свойства диспрергатора: плотности  $\rho$  энтальпии образования,  $\Delta H_{\rm f}^{\circ}$  и массовой доли в диспергаторе трех элементов, например H, C и O (содержание четвертого элемента не является независимым аргументом), т. е. эмпирической формулой

$$L_{\rm rel} = k_1 + k_2 c_{\rm H} + k_3 c_{\rm C} + k_4 c_{\rm O} + k_5 \rho + k_6 \Delta H_{\rm f}^{\circ}, \quad (1)$$

где  $c_{\rm H}$ ,  $c_{\rm C}$ ,  $c_{\rm O}$  — массовые доли H, C, O в соединении;  $\rho$  — плотность (г·см<sup>-3</sup>);  $\Delta H_{\rm f}^{\circ}$  — энтальпия образования (кДж·кг<sup>-1</sup>).

Параметры  $k_i$  были вычислены методом наискорейшего спуска. Вместе с параметрами  $k_i$  были определены и коэффициенты корреляции этих параметров  $r_i$ .

### Обсуждение результатов

Обработка имеющегося набора данных H, C, O,  $\rho$  и  $\Delta H_{\rm f}^{\circ}$ ,  $L_{\rm rel}$  [1] для 49 различных диспергаторов привела к параметрам  $k_i$  уравнения (1) и величинам их коэффициентов корреляции  $r_i$ , представленным в табл. 1.

Среднее отклонение между величинами  $L_{rel}$ , вычисленными по формуле (1), и теми, что получены

Таблица 1
Величины найденных коэффициентов k <sub>i</sub>
эмпирической формулы (1)

ki	Значение	Коэффициент корреляции r <sub>i</sub>
$k_1$	0.836	0.998
$k_2$	0.356	0.865
<i>k</i> <sub>3</sub>	0.069	0.958
$k_4$	-0.00043	0.932
$k_5$	0.138	0.996
$k_6$	1.181.10-5	0.985

в результате классического расчета по всем 49 диспергаторам, составляет всего  $\pm 0.005$  при максимальной величине отклонения 0.016.

Отметим, что величины  $k_5$  и  $k_6$ , характеризующие частные производные  $\delta(L_{\rm rel})/\delta\rho$  и  $\delta(L_{\rm rel})/\delta\Delta H_{\rm f}^{\circ}$ , практически не отличаются от тех, что были выведены в [1] при вариации плотности и  $\Delta H_{\rm f}^{\circ}$  раздельно.

При этом по каждому из найденных параметров коэффициент корреляции  $r_i$  достаточно близок к единице (только для  $k_2$  величина  $r_2 = 0.865$ ). Это говорит о том, что либо в формуле (1) зависимость от доли водорода должна быть иной, чем линейная, либо в исследуемой базе данных мало соединений, существенно разнящихся по доле содержания водорода. Тем не менее величина  $k_2 = 0.356$  говорит о том, что увеличение доли водорода в соединении за счет азота на 0.01 (т. е. на 1 абс%) при прочих равных условиях повысит  $L_{\rm rel}$  лишь на 0.0035, при том что повышение доли водорода в диспергаторе на 1 абс% — это очень резкий скачок, ведь даже насыщенные твердые углеводороды могут содержать не более 15% водорода.

Величина параметра  $k_4$  (по кислороду;  $k_4 = -0.00043$ ) очень низкая, и это означает, что снижение доли кислорода за счет азота на 20 абс% при прочих равных условиях повысит  $L_{\rm rel}$  лишь на 0.01, однако не следует забывать, что при такой замене  $\Delta H_{\rm f}^{\circ}$  должна существенно понизиться.

Попытки повысить коэффициент корреляции  $r_2$ , изменив вид второго слагаемого формулы (1) путем замены линейной зависимости от  $c_{\rm H}$  на степенную, например на  $k_2 c_{\rm H}^a$ , где показатель *а* изменяется от 0.8 до 2.0, не привели к приближению величины  $r_2$ к единице.

Была рассмотрена и другая зависимость, в которой в качестве переменных помимо  $\rho$  и  $\Delta H_{\rm f}^{\circ}$  были приняты массовые содержания  $c_{\rm N}$ ,  $c_{\rm C}$  и  $c_{\rm O}$  (т. е. содержание водорода становится «остальным»):

$$L_{\rm rel} = k_1 + k_2 c_{\rm N} + k_3 c_{\rm N} + k_4 c_{\rm O} + k_5 \rho + k_6 \Delta H_{\rm f}^{\circ}, \quad (2)$$

где *c*<sub>N</sub>, *c*<sub>C</sub>, *c*<sub>O</sub> — массовые доли N, C, O в соединении.

Анализ того же массива исходных данных приводит к параметрам уравнения (2), представленным в табл. 2.

Здесь уже в отличие от результатов анализа имеющегося массива данных по уравнению (1) (табл. 1) коэффициенты корреляции  $r_i$  выше 0.99 для всех рассчитанных параметров  $k_i$ , что соответствует очень высокой степени адекватности выбранной математической модели. Среднее отклонение между  $L_{\rm rel}$ , вычисленными по формуле (2), и теми, что приведены в работе [1] (для всех 49 диспергаторов) как результаты, рассчитанные классическим методом [7, 11], составляет всего ±0.0046 при максимальной величине отклонения 0.013.

То, что в формуле (2) параметры  $k_2 - k_4$  отрицательные, не должно смущать, ведь в качестве аргументов, характеризующих элементный состав, в уравнении (2) присутствуют  $c_N$ ,  $c_C$  и  $c_O$ , но  $c_H$  уже не есть независимая величина, поэтому параметры  $k_2$ ,  $k_3$  и  $k_4$ есть частные производные  $\delta(L_{rel})/\delta(X_i)$  и подразумевают прирост L<sub>rel</sub> при изменении содержания соответствующего элемента  $X_i$  ( $c_N$ ,  $c_C$ ,  $c_O$ ) при постоянстве других параметров, присутствующих в этой формуле (в том числе  $\Delta H_{\rm f}^{\circ}$  и плотности). Следовательно, изменения содержания одного из элементов (С, О или N) автоматически влекут за собой противоположное изменение содержания водорода. А увеличение доли водорода за счет любого из других элементов при постоянных плотности и  $\Delta H_{\rm f}^{\circ}$ , естественно, ведет к резкому повышению теплоты сгорания, повышению среднемолекулярной массы газообразных продуктов превращения, хотя и к определенному снижению адиабатической температуры. Проверим надежность формул (1) и (2) на нескольких примерах.

# Таблица 2

Величины найденных параметров k<sub>i</sub> эмпирической формулы (2)

$k_i$	Значение					
$k_1$	1.1852					
$k_2$	-0.2847					
$k_3$	-0.3537					
$k_4$	-0.3543					
$k_5$	0.1384					
$k_6$	$1.1788 \cdot 10^{-5}$					

Первый пример. Возьмем оптимизированный [эмпирические формулы (1) и (2) выведены именно для оптимизированных рецептур] состав 30% СКИ-3 + + 44.7% бора + 25.3% 7Н-трис([1,2,5]оксадиазоло)-[3,4-b:3',4'-d:3",4"-f]азепин-7-амин-1-оксид [1], C<sub>6</sub>H<sub>2</sub>N<sub>8</sub>O<sub>4</sub> (его элементный состав: 28.809% С, 0.8060% H, 44.798% N и 25.587% О), который согласно расчету классическим методом [7, 11] имеет  $L_{rel} = 1.157$  [1]. Расчет  $L_{rel}$  по формулам (1) и (2) дает величины 1.163 и 1.171 соответственно. Обе эти величины отличаются от 1.157 не более чем на 1.2%. Снизим в диспергаторе C<sub>6</sub>H<sub>2</sub>N<sub>8</sub>O<sub>4</sub> содержание кислорода на 3 абс% за счет водорода, т. е. создадим гипотетическое соединение AA с 28.809% C, 3.8060% Н, 44.798% N и 22.587% О — это молекула с брутто-формулой C<sub>6</sub>H<sub>9.444</sub>N<sub>8</sub>O<sub>3.531</sub>, но с теми же плотностью (1.97 г·см<sup>-3</sup>) и  $\Delta H_{f}^{\circ}$  (2805.3 кДж·кг<sup>-1</sup>).

Вычисление по формуле (1) показывает, что AA при указанных выше граничных условиях может обеспечить достижение величины  $L_{rel} = 1.181$  [расчет по формуле (2) приводит к близкой величине  $L_{rel} = 1.174$ ], т. е. рост содержания водорода в диспергаторе за счет кислорода при прочих равных условиях повышает  $L_{rel}$ . Отметим, что согласно расчету диспергатор AA позволяет достигнуть величины  $L_{rel} = 1.180$ .

Второй пример. Возьмем оптимизированный состав СКИ-3 30% + бор 44.7% + этилендинитрамин (C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>N<sub>4</sub>O<sub>4</sub>;  $d = 1.75 \text{ г}\cdot\text{см}^{-3}$ ,  $\Delta H_{f}^{\circ} = 0 \text{ кДж}\cdot\text{кr}^{-1}$ ; в нем содержания С, Н, N и О равны 16.0033, 4.0295, 37.3271 и 42.6401% соответственно, а величина  $L_{\text{rel}}$ , рассчитанная классическим методом [7, 11], была получена равной 1.107 [1]). Расчет  $L_{\text{rel}}$  по формулам (1) и (2) дает величины 1.103 и 1.113 соответственно, т. е. максимальное отклонение двух последних величин от полученной классическим методом не выше 0.55%. Искусственно снизим в этом диспергаторе содержание водорода за счет кислорода, а именно рассмотрим гипотетическое соединение DD с содержанием C, H, N и O, равным 16.0033, 2.0295, 37.3271 и 44.6401% соответственно (что эквивалентно брутто-формуле  $C_2H_{3.019}N_{3.9985}O_{4.184}$ ), при тех же плотности и  $\Delta H_f^{\circ}$ .

Вычисление по формуле (1) показывает, что компонент DD при указанных выше граничных условиях может обеспечить  $L_{rel} = 1.0955$  [по формуле (2)  $L_{rel} = 1.106$ ], т. е.  $L_{rel}$  снижается при снижении доли водорода в диспергаторе (при переходе от C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>N<sub>4</sub>O<sub>4</sub> к C<sub>2</sub>H<sub>3.019</sub>N<sub>3.9985</sub>O<sub>4.184</sub>).

*Третий пример.* Возьмем динитротрифуразан (C<sub>6</sub>N<sub>8</sub>O<sub>7</sub>): 24.335% С, 37.841% N, 37.824% О (ЭО = 2236.5 кДж·кг<sup>-1</sup>,  $\rho$  = 1.84 кг·м<sup>-3</sup>,  $L_{rel}$  = 1.138). По формулам (1) и (2) получаем величины  $L_{rel}$ , равные 1.133 и 1.137 соответственно. Увеличим в нем долю кислорода за счет углерода, также сохранив  $\Delta H_f^{\circ}$  и плотность, т. е. создадим новый компонент GG с элементным составом 21.335% С, 37.841% N, 40.824% О, что эквивалентно брутто-формуле C<sub>6</sub>N<sub>9.122</sub>O<sub>8.611</sub>. Расчет величины  $L_{rel}$  дает для GG по формулам (1) и (2) величины 1.131 и 1.138 соответственно, т. е. ниже, чем для C<sub>6</sub>N<sub>8</sub>O<sub>7</sub>. Классический же расчет дает  $L_{rel}$  = 1.137, т. е. на 0.5% выше, чем по формуле (1), и практически тот же результат, что получен по формуле (2).

В табл. 3 приведены сводные данные, полученные с применением как эмпирических формул (1) и (2), так и классического метода [7, 11].

Диспергатор	<i>R</i> <sub>1</sub> , результат по формуле (1)	<i>R</i> <sub>2</sub> , результат по формуле (2)	<i>R</i> , результат, полученный классическим метолом [7, 11]	Различие величин <i>R</i> <sub>2</sub> и <i>R</i> <sub>1</sub>	Различие величин <i>R</i> и <i>R</i> <sub>1</sub> %	Различие величин <i>R</i> и <i>R</i> <sub>2</sub>		
$C_6H_2N_8O_4$	1.163	1.171	1.157	0.7	-0.5	-1.2		
AA	1.181	1.174	1.189	-0.6	0.7	1.3		
$C_2H_6N_4O_4$	1.103	1.113	1.107	0.9	0.4	-0.5		
DD	1.095	1.106	1.095	1.0	0.0	-1.0		
$C_6N_8O_7$	1.133	1.137	1.138	0.4	0.4	0.1		
GG	1.131	1.138	1.137	0.6	0.5	-0.1		
Среднее			0.7	0.42	0.7			

**Таблица 3** Величины *L*<sub>rel</sub>, рассчитанные разными методами

#### Таблица 4

Достигаемые величины  $L_{\rm rel}$  составов с разными диспергаторами и состав оптимизированной композиции,  $T_{\rm ad} = 2000 {\rm ~K}$ 

Пионоргатор	С	Н	N	0	ρ,	$\Delta H_{\rm f},^{\circ}$	I	Оптимальная рецептура, %		
диспертатор	%				кг•м-3	кДж∙кг−1	L <sub>rel</sub>	бор	СКИ-3	диспер- гатор
С <sub>6</sub> H <sub>2</sub> N <sub>8</sub> O <sub>4</sub> 7H-трис([1,2,5]- оксадиазоло)- [3,4-b:3',4'-d:3",4"-f]азе- пин-7-амин-1-оксид	28.809	0.806	44.798	25.587	1970	2805.3	1.157	44.7	30.0	25.3
C <sub>6</sub> H <sub>9.444</sub> N <sub>8O3.531</sub> AA	28.809	3.806	44.798	22.587	1970	2805.3	1.180	30.0	41.0	29.0
$C_2H_6N_4O_4$ этилендинитрамин	16.003	4.030	37.327	42.640	1750	0	1.107	43.15	30	26.8
$C_2H_{3.019}N_{3.9985}O_{4.184}\ DD$	16.003	2.030	37.327	44.640	1750	0	1.095	45.15	30	24.84
С <sub>6</sub> N <sub>8</sub> O <sub>7</sub> динитротрифуразан	24.335	0	37.841	37.824	1840	2236.5	1.138	47.1	30	22.90
GG	21.335	0	37.841	40.824	1840	2236.5	1.137	48.03	30	21.96

Видно, что достигается высокая сходимость результатов, полученных по эмпирическим формулам (1) и (2), с результатами классического расчета, но все же применение формулы (1) приводит к меньшей средней величине отклонения от классического, а именно 0.42 против 0.7%. Расчетные результаты, полученные по формуле (1) для шести соединений из табл. 4, отличаются от таковых, рассчитанных по формуле (2), также на 0.7% в среднем.

Следует иметь в виду, что изменение параметров диспергатора может и должно изменить оптимальное соотношение компонентов в рецептуре. Действительно, согласно классическому расчету оптимальные композиции на базе «модифицированных» диспергаторов AA, DD и GG оказались отличными от композиций на базе исходных ( $C_6H_2N_8O_4$ ,  $C_2H_6N_4O_4$ ,  $C_6N_8O_7$ ) (табл. 4).

В качестве примера можно отметить, что существенное повышение доли водорода за счет кислорода в  $C_6H_2N_8O_4$  при прочих равных условиях существенно повышает долю связующего в оптимизированном составе и при этом снижает долю бора.

Использование полученных эмпирических формул позволяет оценить количественный вклад содержания каждого из составляющих элементов предлагаемого диспергатора в величину его баллистической эффективности. Имея в руках такой простой инструмент, химики-синтетики смогут легко оценивать возможности компонентов, намеченных к синтезу, чтобы снизить трудозатраты на поиск способов синтеза массы соединений, которые потом могут оказаться бесперспективными.

#### Выводы

На основании предварительного анализа работы конкретного двигателя летательного аппарата по критерию эффективности полетного задания на различных твердых топливах сформированы эмпирические уравнения, связывающие баллистическую эффективность органического диспергатора топлив для ракетно-прямоточного двигателя с элементным составом, плотностью и энтальпией образования диспергатора. Полученные закономерности должны облегчить поиск новых перспективных диспергаторов за счет сужения круга веществ, намеченных для поиска путей их синтеза.

#### Финансирование работы

Работа выполнена на средства Института проблем химической физики РАН по темам 0089-2019-0005 «Фундаментальные и проблемно-ориентированные исследования в области создания энергетических конденсированных систем (ЭКС) различного назначения» и 0089-2019-0017 «Комплексные фундаментальные и проблемно-ориентированные исследования в области физики и химии горения и тепломассообмена высокоэнергоемких твердых и жидких топлив (горючих) и материалов нового поколения для высокотемпературных камер сгорания прямоточных воздушно-реактивных двигателей (ПВРД)» при финансовой поддержке программой Президиума РАН «Перспективные физико-химические технологии специального назначения».

## Конфликт интересов

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

### Информация об авторах

*Лемперт Давид Борисович*, к.х.н., г.н.с. ИПХФ РАН, ORCID: http://orcid.org/0000-0002-0219-1571

Разносчиков Владимир Валентинович, к.т.н., доцент, с.н.с. ИПХФ РАН и в.н.с. ЦИАМ, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3091-7595

Яновский Леонид Самойлович, д.т.н., проф., зав. отделом ИПХФ РАН и зав. отделом ЦИАМ, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2603-6795

#### Список литературы

- [1] Лемперт Д. Б., Яновский Л. С., Аверьков И. С., Разносчиков В. В. Оценка эффективности твердых топлив на основе высокоэнтальпийных диспергаторов для ракетно-прямоточных двигателей // ЖПХ. 2019. Т. 92. № 3. С. 322–342 [Yanovskii L. S., Lempert D. B., Raznoschikov V. V., Aver'kov I. S.. Evaluation of effectiveness of solid fuels based on high entalpy dispersants for rocket ramjet engines // Russ. J. Appl. Chem. 2019. V. 92. N 3. P. 367–388. https://doi.org/10.1134/S1070427219030078].
- [2] Kalpakli B., Acar E. B., Ulas A. Combustion characteristics experimental study of solid hydrocarbon propellant for air-turbo rocket // Combust. and Flame. 2017. V. 179. P. 267–279.
- [3] Орлов Б. В., Мазинг Г. Ю., Рейдель А. Л., Степанов М. Н., Топчеев Ю. И. Основы проектирования ракетно-прямоточных двигателей для беспилотных летательных аппаратов. М.: Машиностроение, 1967. 424 с.
- [4] Александров В. Н., Быцкевич В. М., Верхоломов В. К., Граменицкий М. Д., Дулепов Н. П., Скибин В. А., Суриков Е. В., Хилькевич В. Я., Яновский Л. С. Интегральные прямоточные воздушно-реактивные

двигатели на твердых топливах (Основы теории расчета). М.: ИКЦ «Академкнига», 2006. 343 с.

- [5] Сорокин В. А., Яновский Л. С., Козлов В. А., Суриков Е. В., Шаров М. С., Фельдман В. Д., Францкевич В. П., Животов Н. П., Абашев В. М., Черваков В. В. Ракетно-прямоточные двигатели на твердых и пастообразных топливах. Основы проектирования и экспериментальной отработки. М.: Физматлит, 2010. С. 24.
- [6] Обносов Б. В., Сорокин В. А., Яновский Л. С., Ягодников Д. А., Францкевич В. П., Животов Н. П., Суриков Е. В., Кобко Г. Г., Тихомиров М. А., Шаров М. С. Конструкция и проектирование комбинированных ракетных двигателей на твердом топливе / Под общ. ред. В. А. Сорокина. М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2012. 303 с.
- [7] Сорокин В. А., Яновский Л. С., Ягодников Д. А. Францкевич В. П., Суриков Е. В., Разносчиков В. В., Захаров Н. Н., Тихомиров М. А., Шаров М. С. Проектирование и отработка ракетно-прямоточных двигателей на твердом топливе: Учеб. пособие / Под общ. ред. В. А. Сорокина. М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2016. С. 12–40.
- [8] Абугов Д. И., Бобылев В. М. Теория и расчет ракетных двигателей твердого топлива. М.: Машиностроение, 1987. 272 с.
- [9] Дулепов Н. П., Котенков Г. К., Яновский Л. С. Прямоточные воздушно-реактивные двигатели на твердых топливах // Актуальные проблемы авиационных и аэрокосмических систем: процессы, модели, эксперимент. 2001. Т. 6. № 2 (12). С. 1–21.
- [10] Дулепов Н. П., Котенков Г. К., Яновский Л. С. Методология проектирования малообъемных ПВРД с регулируемым расходом твердых топлив // Вестн. Рос. акад. космонавтики им. К. Э. Циолковского. 1999. Вып. 4. С. 86–91.
- [11] *Разносчиков В. В.* Системный анализ использования топлива в авиационных силовых установках // Полет. 2008. № 4. С. 28–32.
- [12] Яновский Л. С., Лемперт Д. Б., Разносчиков В. В., Аверьков И. С., Зюзин И. Н., Жолудев А. Ф., Кислов М. Б. Перспективы использования диэтинилбензола в качестве диспергатора топлив для ракетно-прямоточных двигателей // Изв. АН. Сер. хим. 2019. № 10. С. 1848–1855.