

Экспериментальное исследование плотности и теплоемкости жидкого чистого гидразина при введении в него чистых сухих фуллеренов

© В.А. Алтунин¹, Н.Б. Давлатов¹, М.А. Зарипова²,
М.М. Сафаров³, И.Н. Алиев⁴, М.Л. Яновская⁵

¹ Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева — КАИ, Казань, 420111, Россия

² Таджикский технический университет им. академика М.С. Осими, Душанбе, 734042, Таджикистан

³ Филиал Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, Душанбе, 734025, Таджикистан

⁴ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

⁵ Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова, Москва, 111116, Россия

Представлены результаты экспериментального исследования по введению в жидкий чистый гидразин неметаллических нанодобавок — чистых сухих фуллеренов марок C₆₀, C₇₀, C₈₄. Показано влияние фуллеренов на повышение эффективности жидкого чистого гидразина с изменением его плотности и теплоемкости через относительные коэффициенты системы (гидразин + фуллерены) / гидразин при температурах T = 293...560 К и давлениях p = 0,101...49,01 МПа. Разработаны пути повышения эффективности двигателей и энергоустановок летательных аппаратов и самих летательных аппаратов при использовании нового горючего типа «гидразин — фуллерены». В статье изложен новый материал, необходимый для проведения расчетов по созданию эффективных реактивных двигателей и энергоустановок летательных аппаратов одно- и многоразового использования, наземного, воздушного, аэрокосмического и космического базирования, двойного назначения.

Ключевые слова: гидразин, фуллерены, естественная конвекция, относительные коэффициенты, плотность, теплоемкость, эффективность реактивных двигателей, летательный аппарат

Введение. Одним из способов повышения эффективности жидкостных реактивных двигателей и энергоустановок на жидких горючих и охладителях одно- и многоразового использования для различных летательных аппаратов (ЛА) и космических ЛА (КЛА) является повышение эффективности жидких горючих [1–7]. Существуют различные способы повышения эффективности жидких горючих [8–13], один из которых — введение и растворение в них неметаллических добавок. В качестве горючего в статье рассмотрен жидкий чистый гидразин, эффективность которого можно повысить увеличением его плотности, теплоемкости и других теплофизических и термодинамических свойств (ТФС и ТДС) путем введения в него неметаллических добавок — чистых сухих фуллеренов [14–21].

Целью данной статьи является разработка способа повышения эффективности существующего горючего — жидкого чистого гидразина — для реактивных двигателей ЛА, КЛА.

В настоящее время влияние чистых сухих фуллеренов на повышение эффективности жидких горючих и охладителей исследовано только для жидких углеводородных горючих и охладителей (УВГ и УВО) [21–26].

Увеличение плотности — один из главных факторов повышения эффективности жидких горючих. При повышении плотности жидкого горючего открываются различные возможности увеличения эффективности двигателей или энергоустановок, а также эффективности ЛА и КЛА одно- и многоразового использования [1, 4, 6, 7, 10–14]. Так, при полной заправке штатного бака (или отсека) горючего могут быть увеличены:

а) общая масса горючего по сравнению с массой штатного горючего;

б) время (продолжительность) работы воздушно-реактивных двигателей (ВРД), гиперзвуковых прямоточных ВРД (ГПВРД), жидкостных ракетных двигателей (ЖРД), гибридных двигателей на жидких горючих (ВРД + ЖРД) (ГДЖГ), гибридных двигателей на твердом топливе с использованием впрыска жидких горючих (ГДТТЖГ), микро-ЖРД (м-ЖРД), энергоустановок (ЭУ), а также дальность полета различных ЛА, КЛА;

в) число включений и время (продолжительность) работы ЖРД многоразового использования (ЖРДМИ), ЖРД малой тяги (ЖРДМТ), ЖРДМТ многоразового использования (ЖРДМТМИ), ГДЖГ многоразового использования (ГДЖГМИ), ГДТТЖГ многоразового использования (ГДТТЖГМИ), м-ЖРД многоразового использования (м-ЖРДМИ), ЭУ многоразового использования (ЭУМИ).

При заправке нового горючего с повышенной плотностью по нормам штатной заправки штатного горючего происходит неполная заправка штатного бака (или отсека) горючего, благодаря чему может быть увеличена масса полезной нагрузки для ЛА, КЛА, что очень важно, особенно при выведении увеличенного полезного груза на космическую орбиту.

При использовании нового горючего с повышенной плотностью (при сохранении технических характеристик штатного двигателя и всего ЛА, КЛА) возможно конструктивное уменьшение объема бака (или отсека) горючего, что, в свою очередь, позволяет уменьшить массу всего ЛА, КЛА, увеличить массу полезной нагрузки при выведении на орбиту, улучшить аэродинамические качества (повысить аэродинамические характеристики и увеличить дальность полета) ЛА, КЛА.

Одним из новых способов повышения эффективности жидких топлив (горючих) является введение и растворение в них неметаллических энергетических добавок в виде углеродных наночастиц — фуллеренов [6, 10, 12–17, 20, 21].

Результаты экспериментальных исследований ТФС и ТДС жидкого чистого гидразина без введения в него чистых сухих фуллеренов и с их введением были подробно освещены в предыдущих публикациях авторов [6, 14–21].

Данная работа посвящена определению вклада растворенных в гидразине чистых сухих фуллеренов в улучшение ТФС и ТДС новой наножидкости (нового горючего, топлива) типа «гидразин + фуллерены», в частности в повышение плотности и теплоемкости жидкого чистого гидразина, для чего были определены экспериментальные относительные коэффициенты плотности и удельной изобарной теплоемкости.

Влияние фуллеренов на плотность жидкого чистого гидразина. Для определения вклада фуллеренов марок C_{60} , C_{70} , C_{84} с концентрацией 0,1...0,5 % (мас.), введенных в жидкий чистый гидразин, в изменение его плотности при различных значениях давления и температуры были найдены относительные коэффициенты плотности (т. е. зависимости в виде отношений)

$$K_p(T) = (\rho_\phi / \rho_0)_{p=\text{const}}; \quad (1)$$

$$K_p(p) = (\rho_\phi / \rho_0)_{T=\text{const}}. \quad (2)$$

где $K_p(T)$ — относительный коэффициент плотности при изменении температуры и постоянном давлении для системы (гидразин + фуллерены) / гидразин; ρ_ϕ — плотность жидкого чистого гидразина с внедренными фуллеренами марок C_{60} , C_{70} , C_{84} при их концентрации 0,1...0,5 % (мас.); ρ_0 — плотность жидкого чистого гидразина (без внедрения фуллеренов); $K_p(p)$ — относительный коэффициент плотности при изменении давления и постоянной температуре для системы (гидразин + фуллерены) / гидразин.

В статье приводятся данные только при максимальной концентрации фуллеренов (0,5 % мас.), так как при такой концентрации происходят самые эффективные изменения ТФС и ТДС жидкого чистого гидразина.

Результаты расчетов по формулам (1) и (2) представлены в табл. 1 и на рис. 1, 2.

Графики зависимости относительного коэффициента плотности $K_p(T)$ от температуры при постоянном давлении приведены на рис. 1, а, а графики зависимости относительного коэффициента плотности $K_p(p)$ от давления при постоянной температуре — на рис. 2.

Таблица 1

Изменение значений относительных коэффициентов плотности $K_p(T)$ (столбцы) и $K_p(p)$ (строки) различных систем (гидразин + фуллерены) / гидразин при увеличении соответственно температуры и давления

T, К	p, МПа						
	0,101	4,91	9,81	19,62	29,43	39,24	49,01
<i>Система (N₂H₄ + 0,5 % C₆₀) / N₂H₄</i>							
293	1,012	1,012	1,012	1,012	1,011	1,012	1,014
333	1,013	1,012	1,011	1,013	1,012	1,013	1,013
373	1,013	1,012	1,011	1,014	1,014	1,013	1,013
413	–	1,018	1,017	1,013	1,013	1,013	1,013
493	–	1,016	1,015	1,015	1,014	1,015	1,014
533	–	1,010	1,009	1,016	1,015	1,016	1,017
<i>Система (N₂H₄ + 0,5 % C₇₀) / N₂H₄</i>							
293	1,017	1,017	1,016	1,015	1,015	1,016	1,017
333	1,017	1,016	1,014	1,016	1,016	1,016	1,016
373	1,018	1,017	1,017	1,018	1,018	1,017	1,017
413	–	1,022	1,021	1,018	1,017	1,017	1,018
493	–	1,021	1,020	1,019	1,019	1,019	1,021
533	–	1,016	1,015	1,021	1,022	1,018	1,019
<i>Система (N₂H₄ + 0,5 % C₈₄) / N₂H₄</i>							
293	1,021	1,021	1,021	1,018	1,017	1,017	1,018
333	1,023	1,022	1,019	1,020	1,019	1,018	1,017
373	1,024	1,023	1,022	1,021	1,020	1,019	1,018
413	–	1,025	1,025	1,024	1,023	1,022	1,021
493	–	1,025	1,026	1,025	1,024	1,023	1,024
533	–	1,024	1,022	1,026	1,025	1,024	1,023

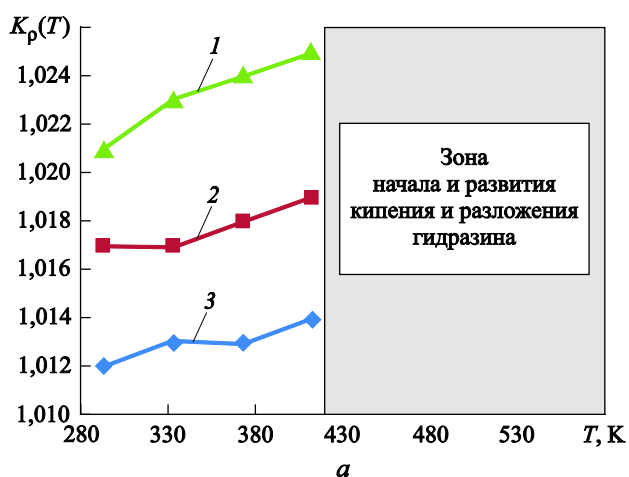


Рис. 1 (начало). Зависимости относительного коэффициента плотности K_p от температуры T при постоянном давлении $p = 0,101$ МПа (а), 4,91 (б), 9,81 (в), 19,62 (г), 29,43 (д), 39,24 (е), 49,01 МПа (ж) для различных систем:

1 — (N₂H₄ + 0,5 % C₈₄)/N₂H₄; 2 — (N₂H₄ + 0,5 % C₇₀)/N₂H₄; 3 — (N₂H₄ + 0,5 % C₆₀)/N₂H₄

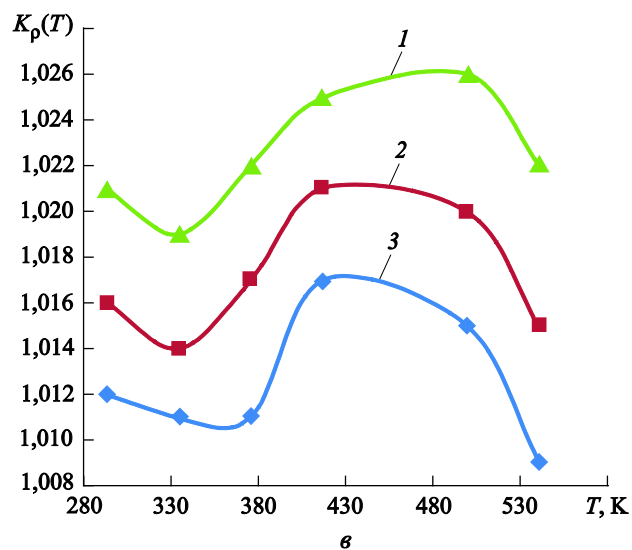
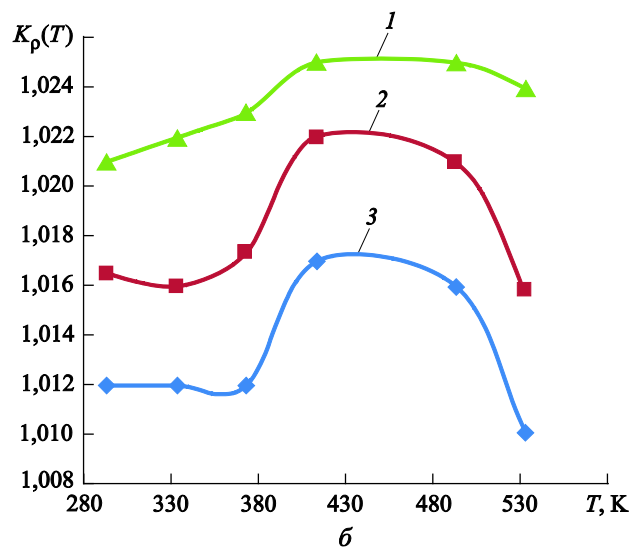


Рис. 1 (продолжение). Зависимости относительного коэффициента плотности K_ρ от температуры T при постоянном давлении $p = 0,101$ МПа (*а*), $4,91$ (*б*), $9,81$ (*в*), $19,62$ (*г*), $29,43$ (*д*), $39,24$ (*е*), $49,01$ МПа (*ж*) для различных систем:

1 — $(\text{N}_2\text{H}_4 + 0,5\% \text{C}_{84})/\text{N}_2\text{H}_4$; *2* — $(\text{N}_2\text{H}_4 + 0,5\% \text{C}_{70})/\text{N}_2\text{H}_4$; *3* — $(\text{N}_2\text{H}_4 + 0,5\% \text{C}_{60})/\text{N}_2\text{H}_4$

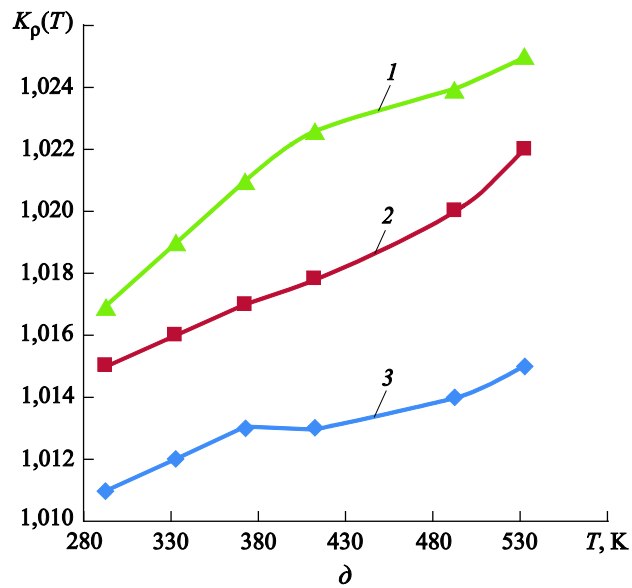
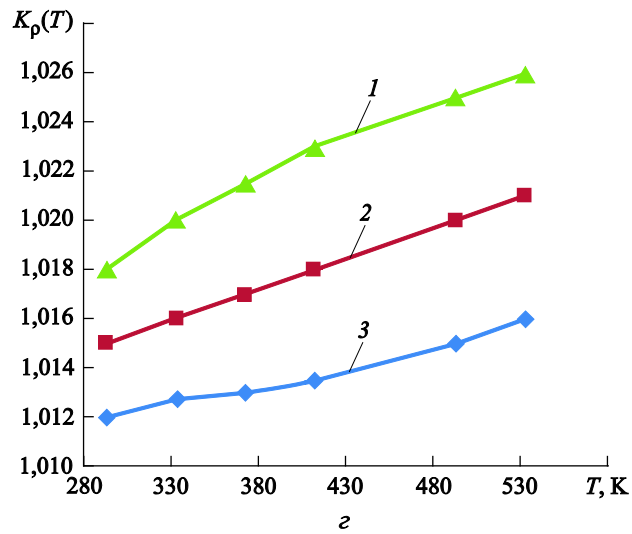


Рис. 1 (продолжение). Зависимости относительного коэффициента плотности K_p от температуры T при постоянном давлении $p = 0,101$ МПа (а), 4,91 (б), 9,81 (в), 19,62 (г), 29,43 (д), 39,24 (е), 49,01 МПа (ж) для различных систем:

1 — $(N_2H_4 + 0,5 \% C_{84})/N_2H_4$; 2 — $(N_2H_4 + 0,5 \% C_{70})/N_2H_4$; 3 — $(N_2H_4 + 0,5 \% C_{60})/N_2H_4$

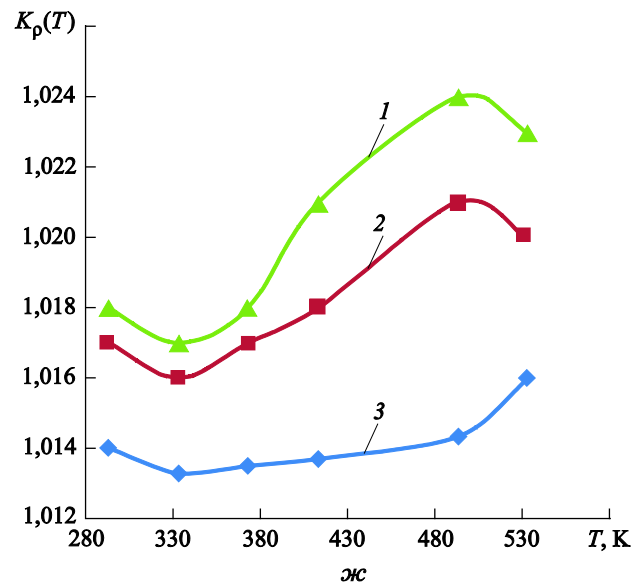
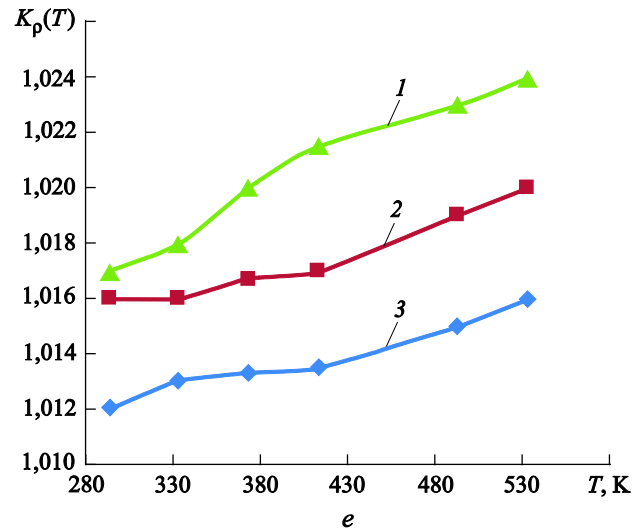


Рис. 1 (окончание). Зависимости относительного коэффициента плотности K_p от температуры T при постоянном давлении $p = 0,101$ МПа (*а*), $4,91$ (*б*), $9,81$ (*в*), $19,62$ (*з*), $29,43$ (*д*), $39,24$ (*е*), $49,01$ МПа (*ж*) для различных систем:

1 — $(N_2H_4 + 0,5 \% C_{84})/N_2H_4$; 2 — $(N_2H_4 + 0,5 \% C_{70})/N_2H_4$; 3 — $(N_2H_4 + 0,5 \% C_{60})/N_2H_4$

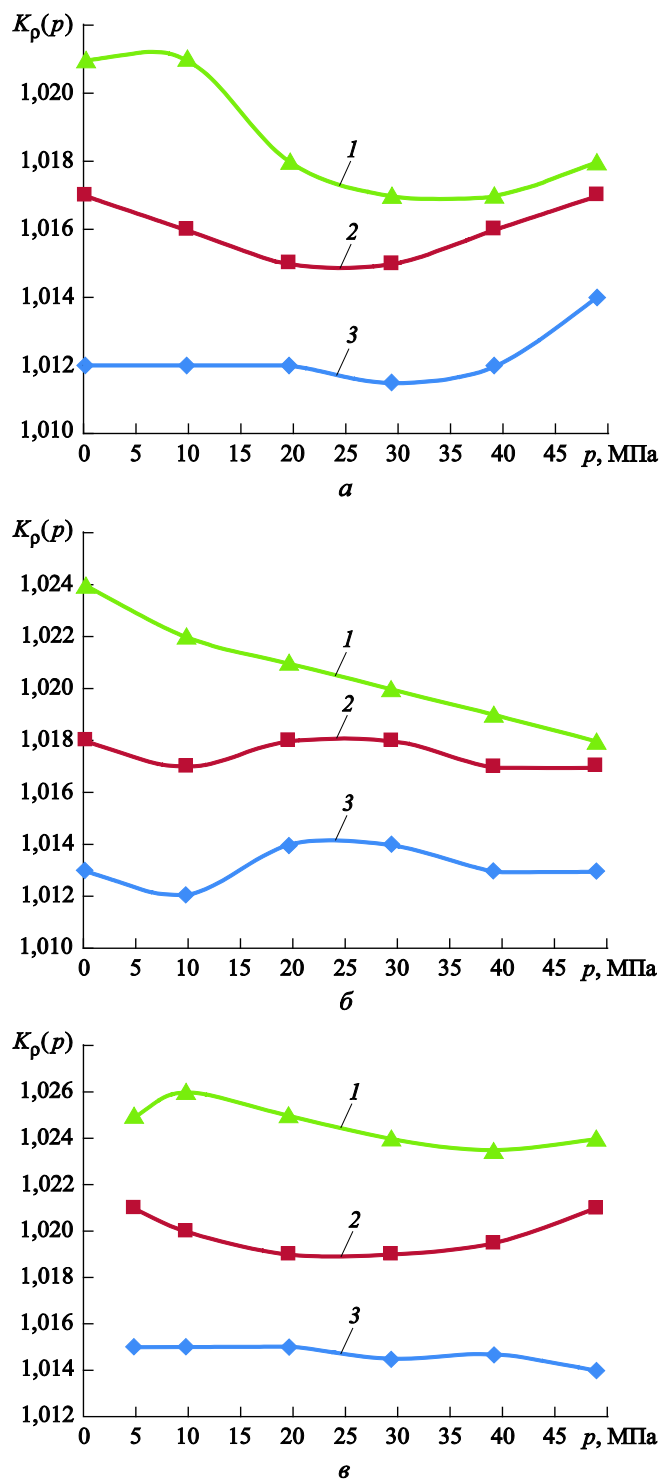


Рис. 2. Зависимости относительного коэффициента плотности K_p от давления p при постоянной температуре $T = 293$ К (а), 373 (б), 493 К (в) для различных систем: 1 — $(\text{N}_2\text{H}_4 + 0,5\% \text{C}_{84}) / \text{N}_2\text{H}_4$; 2 — $(\text{N}_2\text{H}_4 + 0,5\% \text{C}_{70}) / \text{N}_2\text{H}_4$; 3 — $(\text{N}_2\text{H}_4 + 0,5\% \text{C}_{60}) / \text{N}_2\text{H}_4$

На рис. 1 и 2 видно, что максимальные значения относительных коэффициентов плотности $K_p(T)$ и $K_p(p)$ при различных значениях температуры и давления получаются при введении фуллеренов марки C₈₄.

Влияние фуллеренов на удельную изобарную теплоемкость жидкого чистого гидразина. Для определения вклада фуллеренов марок C₆₀, C₇₀, C₈₄ с концентрацией 0,1...0,5 % (мас.), введенных в жидкий чистый гидразин, в изменение его удельной изобарной теплоемкости при различных значениях температуры и давления были найдены относительные коэффициенты удельной изобарной теплоемкости (т. е. зависимости в виде отношений)

$$K_{c_p}(T) = (c_p^\Phi / c_p^0)_{p=\text{const}}; \quad (3)$$

$$K_{c_p}(p) = (c_p^\Phi / c_p^0)_{T=\text{const}}, \quad (4)$$

где $K_{c_p}(T)$ — относительный коэффициент удельной изобарной теплоемкости системы (гидразин + фуллерены) / гидразин при изменении температуры T и постоянном давлении p ; c_p^Φ — удельная изобарная теплоемкость жидкого чистого гидразина с внедренными фуллеренами марок C₆₀, C₇₀, C₈₄ при их концентрации 0,1...0,5 % (мас.); c_p^0 — удельная изобарная теплоемкость жидкого чистого гидразина (без внедрения фуллеренов); $K_{c_p}(p)$ — относительный коэффициент удельной изобарной теплоемкости системы (гидразин + фуллерены) / гидразин при изменении давления p и постоянной температуре T .

Результаты численных расчетов по выражениям (3) и (4) представлены в табл. 2 и на рис. 3 и 4.

Таблица 2

Изменение значений относительных коэффициентов удельной изобарной теплоемкости $K_{c_p}(T)$ (столбцы) и $K_{c_p}(p)$ (строки) различных систем (гидразин + фуллерены) / гидразин при увеличении соответственно температуры и давления

T, К	p, МПа						
	0,101	4,91	9,81	19,62	29,43	39,24	49,01
<i>Система (N₂H₄ + 0,5 % C₆₀) / N₂H₄</i>							
293	1,032	1,034	1,035	1,039	1,042	1,046	1,049
333	1,027	1,028	1,030	1,032	1,037	1,039	1,045
373	1,024	1,026	1,027	1,028	1,028	1,030	1,040
433	–	1,020	1,020	1,020	1,018	1,026	1,033
533	–	1,012	1,011	1,015	1,017	1,023	1,024
593	–	1,006	1,003	1,012	1,007	1,021	1,021
<i>Система (N₂H₄ + 0,5 % C₇₀) / N₂H₄</i>							
293	1,053	1,056	1,063	1,064	1,062	1,063	1,069
333	1,046	1,049	1,049	1,053	1,051	1,052	1,063
373	1,040	1,043	1,044	1,047	1,040	1,042	1,056

T, К	p, МПа						
	0,101	4,91	9,81	19,62	29,43	39,24	49,01
Система (N ₂ H ₄ + 0,5 % C ₇₀)/N ₂ H ₄							
433	–	1,033	1,032	1,035	1,029	1,034	1,042
533	–	1,018	1,019	1,022	1,023	1,028	1,033
593	–	1,010	1,007	1,016	1,014	1,027	1,025
Система (N ₂ H ₄ + 0,5 % C ₈₄)/N ₂ H ₄							
293	1,059	1,060	1,064	1,068	1,069	1,073	1,082
333	1,054	1,058	1,058	1,061	1,061	1,065	1,075
373	1,051	1,054	1,055	1,055	1,053	1,059	1,071
433	–	1,048	1,051	1,043	1,046	1,057	1,066
533	–	1,043	1,042	1,040	1,042	1,056	1,060
593	–	1,037	1,035	1,038	1,039	1,053	1,058

Графики зависимости относительной удельной изобарной теплоемкости $K_{c_p}(T)$ при постоянных давлениях приведены на рис. 3.

На рис. 3 видно, что наибольшие значения относительного коэффициента удельной изобарной теплоемкости $K_{c_p}(T)$ при различных значениях давления p получаются при введении фуллеренов марки C₈₄.

На рис. 4 представлены результаты расчета относительной удельной изобарной теплоемкости $K_{c_p}(p)$ трех рассматриваемых систем при постоянных температурах.

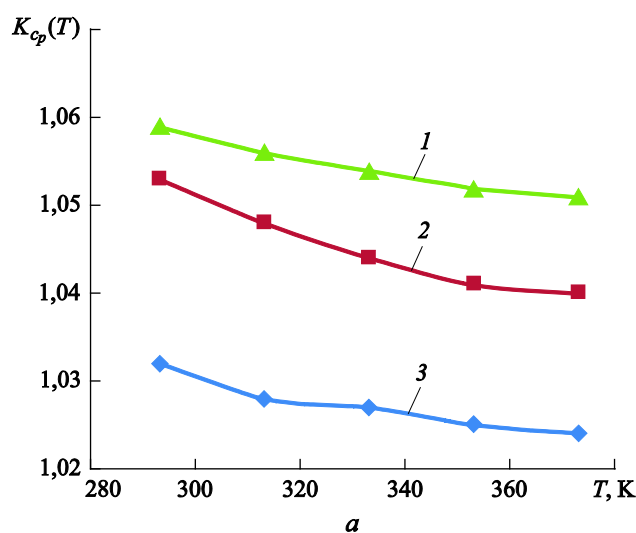


Рис. 3 (начало). Зависимость относительного коэффициента удельной изобарной теплоемкости K_{c_p} от температуры T при давлении $p = 0,101$ МПа (а), 4,91 (б), 9,81 (в), 19,62 (г), 29,43 (д), 39,24 (е), 49,01 МПа (ж) для различных систем:

1 — (N₂H₄ + 0,5 % C₈₄)/N₂H₄; 2 — (N₂H₄ + 0,5 % C₇₀)/N₂H₄; 3 — (N₂H₄ + 0,5 % C₆₀)/N₂H₄

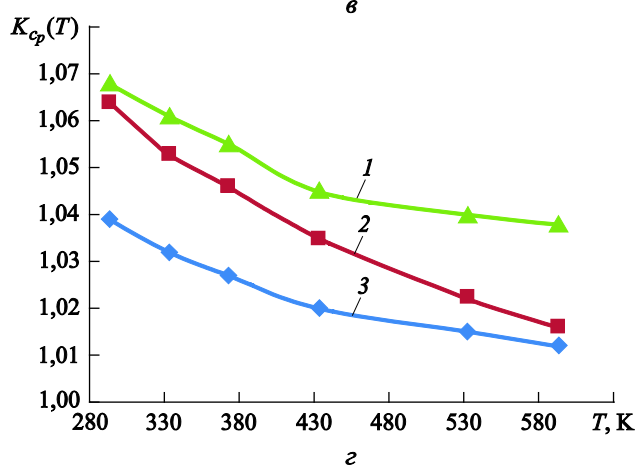
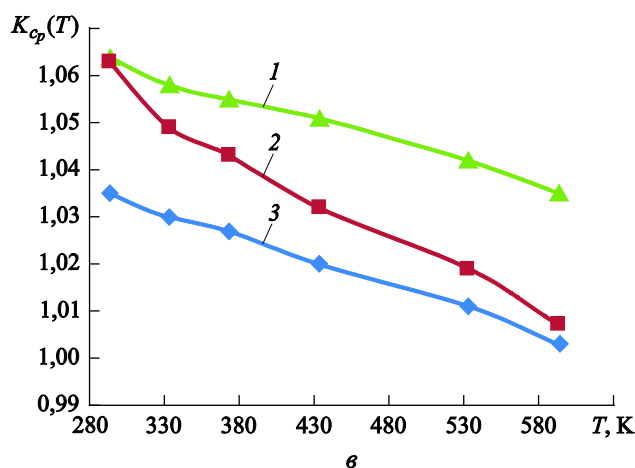
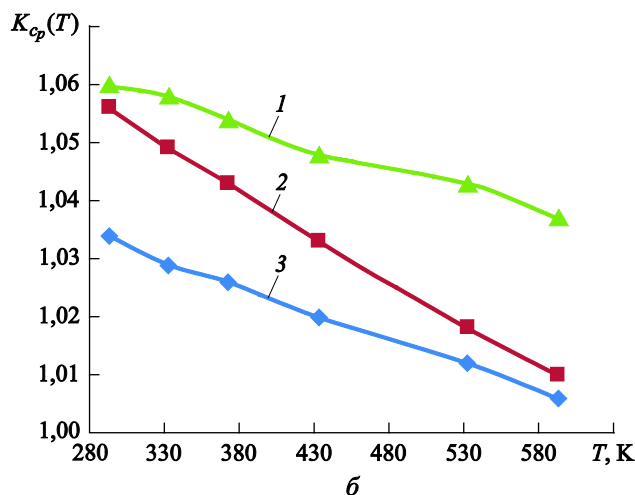


Рис. 3 (продолжение). Зависимость относительного коэффициента удельной изобарной теплоемкости K_{cp} от температуры T при давлении $p = 0,101$ МПа (а), 4,91 (б), 9,81 (в), 19,62 (г), 29,43 (д), 39,24 (е), 49,01 МПа (ж) для различных систем: 1 — $(N_2H_4 + 0,5 \% C_{84})/N_2H_4$; 2 — $(N_2H_4 + 0,5 \% C_{70})/N_2H_4$; 3 — $(N_2H_4 + 0,5 \% C_{60})/N_2H_4$

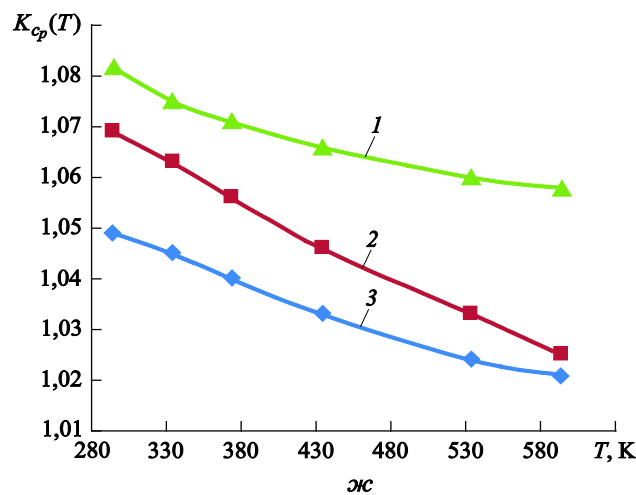
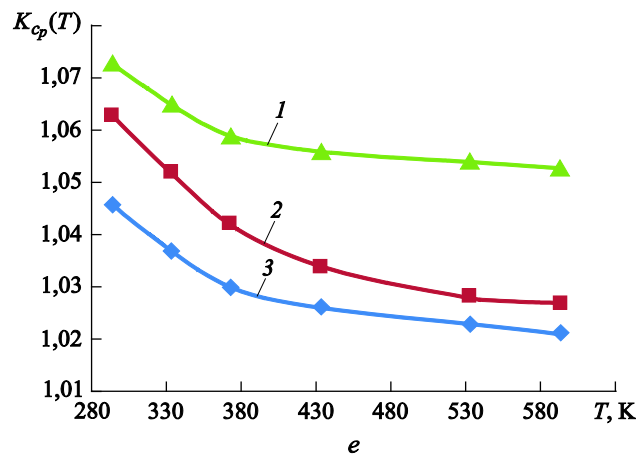
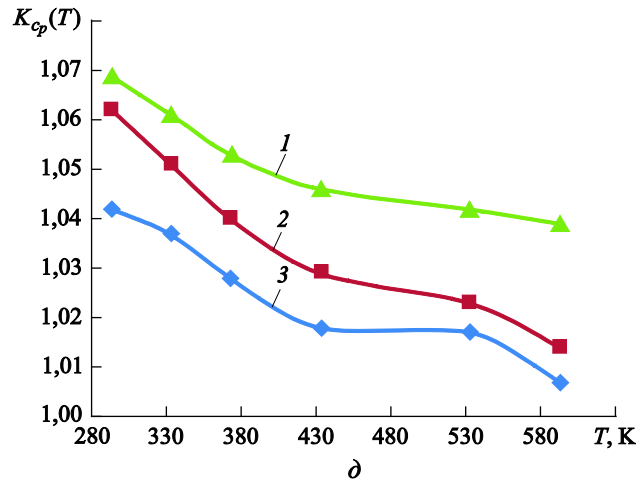


Рис. 3 (окончание). Зависимость относительного коэффициента удельной изобарной теплоемкости K_{cp} от температуры T при давлении $p = 0,101$ МПа (а), $4,91$ (б), $9,81$ (в), $19,62$ (г), $29,43$ (д), $39,24$ (е), $49,01$ МПа (ж) для различных систем: 1 — $(N_2H_4 + 0,5 \% C_{84})/N_2H_4$; 2 — $(N_2H_4 + 0,5 \% C_{70})/N_2H_4$; 3 — $(N_2H_4 + 0,5 \% C_{60})/N_2H_4$

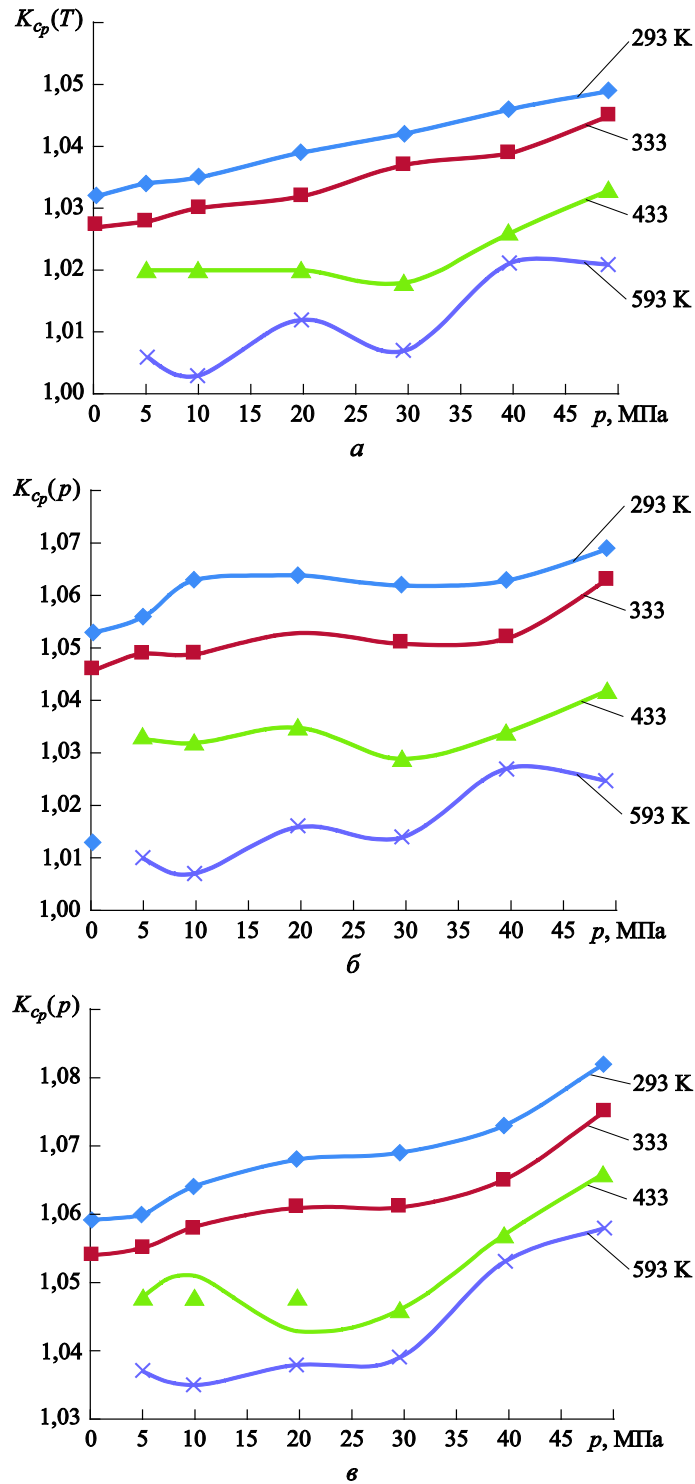


Рис. 4. Зависимости относительного коэффициента удельной изобарной теплоемкости K_{cp} от давления p при постоянных температурах T для различных систем: a — $(N_2H_4 + 0,5\% C_{60})/N_2H_4$; $б$ — $(N_2H_4 + 0,5\% C_{70})/N_2H_4$; $в$ — $(N_2H_4 + 0,5\% C_{84})/N_2H_4$

На рис. 4 видно, что наибольшие значения относительного коэффициента удельной изобарной теплоемкости $K_{c_p}(p)$ от давления p при постоянных температурах T получаются при введении фуллеренов марки C_{84} .

Пример расчета влияния фуллеренов на увеличение дальности и времени полета ЛА. Известно, что дальность L полета ЛА определяется по формуле [1–10]

$$L = m/C_k, \quad (5)$$

где m — масса топлива (горючего); C_k — километровый расход топлива (горючего) (расход топлива (горючего) на 1 км полета ЛА).

Масса топлива (горючего) рассчитывается по формуле [1–10, 26–28]

$$m = \rho V, \quad (6)$$

где ρ — плотность топлива (горючего); V — объем бака горючего.

Пусть для жидкого чистого гидразина $m = 1000$ кг, $C_k = 5$ кг/км. Тогда по формуле (5) получим дальность полета ЛА:

$$L = 1000/5 = 200 \text{ км.}$$

После внедрения в жидкий чистый гидразин чистых сухих фуллеренов, например, марки C_{84} с концентрацией 0,5 % (мас.) плотность нового топлива (горючего) типа «жидкий гидразин + фуллерен (0,5 % C_{84})» будет увеличенной. Для примера возьмем из табл. 1 относительный коэффициент плотности системы (гидразин + фуллерен (0,5 % C_{84})) / гидразин, равный 1,025:

$$K_\rho(T) = (\rho_\phi / \rho_0)_{p=\text{const}} = 1,025.$$

Тогда плотность нового топлива (горючего) можно найти по формуле

$$\rho_\phi = K_\rho(T)\rho_0 = 1,025\rho_0,$$

т. е. плотность нового топлива (горючего) больше плотности жидкого чистого гидразина из-за наличия множителя 1,025.

Масса нового топлива (горючего) при том же объеме бака горючего также увеличится из-за наличия множителя 1,025:

$$M_1 = 1,025\rho_0 V = 1,025m. \quad (7)$$

Найдем массу нового топлива (горючего) по формуле (7):

$$M_1 = 1,025 \cdot 1000 = 1025 \text{ кг.}$$

При использовании нового топлива (горючего) дальность L_1 полета ЛА также будет увеличенной, ее можно найти по формуле

$$L_1 = M_1/C_k, \quad (8)$$

$$L_1 = 1025/5 = 205 \text{ км.}$$

Найдем относительное увеличение дальности полета ЛА (в процентах) по формуле

$$L_{\text{отн}} = [(L_1 - L)/L] \cdot 100 \%; \quad (9)$$

$$L_{\text{отн}} = [(205 - 200)/200] \cdot 100 \% = 2,5 \%.$$

Далее можно найти и время (продолжительность) полета ЛА при использовании жидкого чистого гидразина, а также при использовании нового топлива (горючего).

Время (продолжительность) полета ЛА определяется по формуле [1–10, 26–28]

$$T = m/C_{\text{ч}}, \quad (10)$$

где m — масса топлива (горючего); $C_{\text{ч}}$ — часовой расход топлива (горючего) (расход топлива (горючего) за 1 ч полета ЛА).

Пусть для жидкого чистого гидразина $m = 1000$ кг, $C_{\text{ч}} = 250$ кг/ч. Тогда время полета ЛА

$$T = 1000/250 = 4 \text{ ч} = 240 \text{ мин.}$$

После внедрения фуллеренов в жидкий чистый гидразин, например, марки С₈₄ с концентрацией 0,5 % (мас.), масса нового топлива (горючего) будет увеличенной, как и в примере расчета дальности полета ЛА:

$$M_1 = 1,025 m = 1025 \text{ кг.}$$

Найдем продолжительность полета ЛА при использовании нового топлива (горючего) по формуле

$$T_1 = M_1/C_{\text{ч}}; \quad (11)$$

$$T_1 = 1025/250 = 4,1 \text{ ч} = 246 \text{ мин.}$$

Определим относительную продолжительность полета ЛА (в процентах) по формуле

$$T_{\text{отн}} = [(T_1 - T)/T] \cdot 100 \%; \quad (12)$$

$$T_{\text{отн}} = [(246 - 240)/240] \cdot 100 \% = 2,5 \%.$$

Из этих расчетов видно, что фуллерены действительно увеличивают дальность и время (продолжительность) полета ЛА. Открывается возможность реального увеличения эффективности ЛА, КЛА.

Кроме того, можно определить уменьшение массы двигателей (или бака горючего), массы дополнительной нагрузки для выведения на орбиту и рассчитать другие параметры, что будет показано в следующей статье.

Авторами разработаны способы введения фуллеренов в гидразин при различных условиях эксплуатации ЛА, КЛА. В частности, предлагается:

1) располагать бортовые устройства для ввода конкретной марки и концентрации фуллеренов в жидкий чистый гидразин в ходе воздушных, гиперзвуковых, аэрокосмических и космических полетов на борту воздушных, гиперзвуковых, аэрокосмических и космических ЛА одно- и многоразового использования снаружи или внутри бака (отсека или специального бака) горючего;

2) заполнять бортовые устройства для ввода фуллеренов в жидкий чистый гидразин перед полетом ЛА, КЛА фуллеренами в виде чистого сухого порошка или в виде раствора чистых сухих фуллеренов в жидком чистом гидразине;

3) создавать бортовые устройства для ввода фуллеренов в жидкий чистый гидразин, которые конструктивно могут быть:

- одноразового использования (для двигателей и энергоустановок одноразового использования; для ЛА и КЛА одноразового использования);

- многоразового использования (для двигателей и энергоустановок многоразового включения и использования; для ЛА, КЛА многоразового использования);

- стационарные или съемные (заменяемые в незаправленном или заправленном виде);

4) вводить фуллерены конкретной марки и определенной концентрации в жидкий чистый гидразин:

- в наземных условиях — в специальных стационарных или мобильных баках или цистернах; непосредственно в баках или отсеках горючего на ЛА, КЛА; перед запуском двигателей и энергоустановок ЛА, КЛА;

- в воздушных условиях — непосредственно в баках или отсеках горючего ЛА; в ходе работы двигателей и энергоустановок при полете ЛА;

- в космических условиях — непосредственно в баках или отсеках горючего ЛА, КЛА; в период молчания двигателей и ЭУ на орбите, а также в ходе их работы; в период подготовки (сбора и повышения эффективности) бортового горючего и КЛА к вводу на дальние орбиты захоронения или к спуску на Землю — ввод фуллеренов может осуществляться в общем баке или отсеке горючего, а также — в специальных дополнительных баках, куда собираются

остатки бортового горючего, или горючее заправляется на Земле до начала полета;

5) конструктивно объединять бортовые устройства для ввода фуллеренов в жидкий чистый гидразин в общую батарею, где каждое устройство заправляется фуллеренами только одной определенной марки (например, C_{60} , C_{70} или C_{84}) и с какой-то только одной концентрацией (например, 0,1; 0,2; 0,3; 0,4 или 0,5 % (мас.));

6) осуществлять ввод фуллеренов в жидкий чистый гидразин вручную, полуавтоматически и автоматически;

7) применять для более эффективного смешения и растворения фуллеренов в жидком чистом гидразине электростатические поля с рабочими соосными иглами, расположенными внутри бака горючего таким образом, чтобы обеспечивать крутку жидкости в одном направлении [14–17, 27, 28];

8) осуществлять выбор и задействование заполненного фуллеренами конкретной марки и определенной концентрации бортового устройства для их ввода в жидкий чистый гидразин по экспериментальной базе данных увеличения плотности топлива (горючего) (по таблицам или графикам) вручную, полуавтоматически или автоматически в целях выполнения различных полетных заданий и задач для пилотируемых и беспилотных ЛА, КЛА одно- и многоразового использования, двойного назначения;

9) в автоматическом режиме заносить информацию о вводе фуллеренов в жидкий чистый гидразин и их полном растворении в нем в бортовой и наземный компьютер, а также выводить ее на информационное табло летчика-космонавта и наземного оператора.

Заключение. Проведение экспериментальных исследований плотности и теплоемкости жидкого чистого гидразина при различных значениях температуры и давления ($T = 293...630$ К; $p = 0,101...49,1$ МПа) в условиях его естественной конвекции без введения и с введением чистых сухих фуллеренов позволило авторам:

- впервые определить вклад фуллеренов в повышение плотности и теплоемкости жидкого чистого гидразина с получением новой наножидкости (горючего, топлива) типа «гидразин + фуллерены»;
- впервые определить, что наиболее эффективными из исследуемых марок фуллеренов C_{60} , C_{70} , C_{84} являются фуллерены марки C_{84} ;
- впервые создать экспериментальную базу данных по относительным коэффициентам плотности и теплоемкости системы (гидразин + фуллерены) / гидразин;
- впервые определить возможность повышения эффективности двигателей ЛА, КЛА, а также самих ЛА, КЛА за счет влияния растворенных в жидком чистом гидразине фуллеренов;

• разработать способы введения фуллеренов в гидразин в различных условиях эксплуатации ЛА, КЛА.

Применение материалов статьи будет способствовать повышению качества расчетов и конструктивных инновационных разработок новых отечественных реактивных двигателей и ЭУ для ЛА, КЛА, а также самих ЛА, КЛА одно- и многоразового использования повышенной эффективности, различного базирования и назначения.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Гапоненко О.В. Основные направления развития прорывных технологий в космической деятельности России и проблемы их разработки и внедрения. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2019, вып. 6 (90). DOI: 10.18698/2308-6033-2019-6-1893
- [2] *NASA Strategic Technology Investment Plan*. NASA, Office of the Chief Technologist, 2017. URL: https://www.nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/2017-8-1_stip_final-508ed.pdf (дата обращения 24.05.2018).
- [3] Коломенцев А.И., Байков А.В., Мартыненко С.И., Якутин А.В., Яновский Л.С., Теличкин Д.С., Цыгенхаген Ш. Проблема разработки микро-двигательных установок. *Изв. вузов. Авиационная техника*, 2010, № 2, с. 53–55.
- [4] Ковалёв В.Д., Гимбицкий В.А., Гимбицкая Л.А., Марченко Е.И. К вопросу увеличения дальности и продолжительности полета летательного аппарата. *Наука вчера, сегодня, завтра: сб. ст. по материалам 18–19-й Междунар. научно-практ. конф. Новосибирск, 8 декабря 2014 г.* Новосибирск, СибАК, 2014, № 11–12 (17), с. 30–36.
- [5] Фомин В.М., Звезгинцев В.И., Мажуль И.И., Шумский В.В. Анализ эффективности использования комбинированной силовой установки для разгона малоразмерных ракет, стартующих с поверхности Земли. *Прикладная механика и техническая физика*, 2010, т. 54, № 6, с. 21–30.
- [6] Абдуллин М.Р., Давлатов Н.Б., Шигапов Р.Р. Анализ и классификация путей совершенствования жидкостных ракетных двигателей одно- и многоразового использования на углеводородных и азотосодержащих горючих и охладителях. *Материалы докл. междунар. молодежной науч. конф. «24-е Туполевские чтения», посвященной 130-летию со дня рождения авиаконструктора И.И. Сикорского. Казань, 7–8 ноября 2019 г., КНИТУ-КАИ*. Казань, Изд-во КНИТУ-КАИ, 2019, т. 2, с. 314–320.
- [7] Аверьков И.С., Разносчиков В.В., Яновский Л.С. Влияние свойств топлив на характеристики летательного аппарата с прямоточным воздушно-реактивным двигателем. *Авиационные двигатели*, 2018, № 1, с. 73–81.
- [8] Аверьков И.С., Демская И.А., Катков Р.Э., Разносчиков В.В., Самсонов Д.А., Тупицын Н.Н., Яновский Л.С. Анализ энергетических возможностей составных углеводородных горючих для кислородных двигателей космических ракетных ступеней. *Космическая техника и технологии*, 2017, № 4 (19), с. 46–51.
- [9] Большаков Г.Ф. *Химия и технология компонентов жидкого ракетного топлива*. Ленинград, Химия, 1983, 320 с.
- [10] Хавкин А.В., Гуляева Л.А., Белоусов А.И. Производство реактивных топлив повышенной плотности (Т-8В и Т-6). *Мир нефтепродуктов. Вестник нефтяных компаний*, 2015, № 4, с. 13–16.

- [11] Дубовкин Н.Ф., Яновский Л.С., Шигабиев Т.Н., Галимов Ф.М., Иванов В.Ф. *Инженерные методы определения физико-химических и эксплуатационных свойств топлив*. Казань, Мастер Лайн, 2000, 378 с.
- [12] Яновский Л.С., ред. *Энергоемкие горючие для авиационных и ракетных двигателей*. Москва, Физматлит, 2009, 400 с.
- [13] Данилов А.М. *Применение присадок в топливах*. 3-е изд. Санкт-Петербург, Химиздат, 2010, 360 с.
- [14] Алтунин В.А., Давлатов Н.Б., Зарипова М.А., Платонов Е.Н., Яновская М.Л. Некоторые пути повышения эффективности углеводородных и азотосодержащих горючих космического применения. *Журнал «Военмех. Вестник БГТУ»*, 2019, № 55, с. 424–429.
- [15] Алтунин В.А., Давлатов Н.Б., Зарипова М.А., Сафаров М.М., Платонов Е.Н., Яновская М.Л. Способы повышения эффективности теплофизических и термодинамических свойств жидких углеводородных и азотосодержащих горючих для двигателей и энергоустановок космического применения. *Тр. 53-х чтений, посвященных разработке научного наследия и развитию идей К.Э. Циолковского. Калуга, 18–19 сентября 2018 г., РАН, РАКЦ*. Казань, Изд-во Казан. ун-та, 2019, с. 138–148.
- [16] Алтунин В.А., Абдуллин М.Р., Платонов Е.Н., Давлатов Н.Б., Зарипова М.А., Сафаров М.М., Яновская М.Л. Разработка способов повышения эффективности теплофизических и термодинамических свойств жидких углеводородных и азотосодержащих горючих и охладителей для двигателей гиперзвуковых, аэрокосмических и космических летательных аппаратов. *Материалы докл. 43-х Академических чтений по космонавтике, посвященных памяти акад. С.П. Королёва и других выдающихся отечественных ученых — пионеров освоения космического пространства*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2019, т. 2, с. 71–72.
- [17] Алтунин В.А., Алтунин К.В., Алиев И.Н., Абдуллин М.Р., Давлатов Н.Б., Платонов Е.Н., Яновская М.Л. Некоторые пути повышения эффективности жидких и газообразных углеводородных и азотосодержащих горючих для двигателей летательных аппаратов. *Тепловые процессы в технике*, 2019, т. 11, № 10, с. 453–479.
- [18] Алтунин В.А., Давлатов Н.Б., Зарипова М.А., Сафаров М.М., Алиев И.Н., Яновская М.Л. Экспериментальное исследование теплофизических свойств жидкого чистого гидразина при различных температурах и давлениях. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2019, вып. 10 (94). <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2019-10-1922>
- [19] Алтунин В.А., Давлатов Н.Б., Зарипова М.А., Сафаров М.М., Алиев И.Н., Яновская М.Л. Экспериментальное исследование плотности и теплоемкости жидкого чистого гидразина. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2019, вып. 11 (95). DOI: 10.18698/2308-6033-2019-11-1934
- [20] Алтунин В.А., Давлатов Н.Б., Зарипова М.А., Алиев И.Н., Яновская М.Л. Экспериментальная база и методики проведения исследований теплофизических свойств жидкого чистого гидразина и его смесей с неметаллическими добавками — фуллеренами. *Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева*, 2019, № 3, с. 30–38.
- [21] Алтунин В.А., Давлатов Н.Б., Зарипова М.А., Алиев И.Н., Яновская М.Л. Результаты экспериментальных исследований и методика расчёта теплофизических свойств гидразина и его смесей с фуллеренами. *Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева*, 2019, № 3, с. 39–51.
- [22] Сидоров Л.Н., Юровская М.А., Борщевский А.Я., Трушков И.В., Иоффе И.Н. *Фуллерены*. Москва, Экзамен, 2005, 688 с.

- [23] Мекалова Н.В. *Фуллерены в растворах*. Уфа, Изд-во «Уфимский гос. нефтяной техн. ун-т», 2001, 107 с.
- [24] Шпилевский Э.М. Фуллерены — новые молекулы для новых материалов. *Наука и инновации*, 2006, № 5, с. 32–38.
- [25] Терехов А.И., Терехов А.А. Исследования и разработки в области фуллеренов в России: опыт наукометрического анализа. *Российский химический журнал*, 2006, т. 50, № 1, с. 114–118.
- [26] Витязь П.А., ред. *Фуллерены и наноструктуры в конденсированных средах*. Сб. науч. ст. Минск, Изд-во «Институт тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова НАН Беларуси», 2018, 299 с.
- [27] Altunin V.A., Altunin K.V., Aliev I.N., Gortyshov U.F., Dresvyannikov F.N., Obukhova L.A., Tarasevich S.E., Yanovskaya M.L. Analysis of investigations of electric fields in different media and conditions. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2012, vol. 85, no. 4, pp. 959–976.
- [28] Алиев И.Н., Юрченко С.О., Назарова Е.В. Особенности комбинированной неустойчивости заряженной границы раздела движущихся сред. *ИФЖ*, 2007, т. 80, № 5, с. 64–69.

Статья поступила в редакцию 25.11.2019

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Алтунин В.А., Давлатов Н.Б., Зарипова М.А., Сафаров М.М., Алиев И.Н., Яновская М.Л. Экспериментальное исследование плотности и теплоемкости жидкого чистого гидразина при введении в него чистых сухих фуллеренов. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2020, вып. 2.

<http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2020-2-1957>

Алтунин Виталий Алексеевич — д-р техн. наук, профессор кафедры «Теплотехника и энергетическое машиностроение», академик Российской академии космонавтики им. К.Э. Циолковского (РАКЦ), президент Казанского регионального отделения РАКЦ (КазРО РАКЦ). КНИТУ им. А.Н. Туполева — КАИ. e-mail: altspacevi@yahoo.com

Давлатов Наджибулло Бахромович — соискатель ученой степени кандидата технических наук Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева — КАИ. e-mail: dnadzhibullo@bk.ru

Зарипова Мохира Абдулсаломовна — д-р техн. наук, доцент Таджикского технического университета им. академика М.С. Осими, член-корреспондент Инженерной академии республики Таджикистан. e-mail: mohira.zaripova@list.ru

Сафаров Махмадали Махмадиевич — д-р техн. наук, профессор, заведующий лабораторией филиала МГУ им. М.В. Ломоносова в Республике Таджикистан, академик Инженерной академии республики Таджикистан, академик Международной инженерной академии, академик МАХ, заслуженный деятель науки и техники Республики Таджикистан. e-mail: mahmadl@list.ru

Алиев Исмаил Новрузович — д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры «Техническая физика» МГТУ им. Н.Э. Баумана. e-mail: alievprof@yandex.ru

Яновская Мария Леонидовна — канд. техн. наук, младший научный сотрудник ЦИАМ им. П.И. Баранова. e-mail: maria-yanovskaya-ww@yandex.ru

Experimental investigation of density and thermal capacity of liquid pure hydrazine with the introduction of pure dry fullerenes

© V.A. Altunin¹, N.B. Davlatov¹, M.A. Zaripova², M.M. Safarov³,
I.N. Aliev⁴, M.L. Yanovskaya⁵

¹ Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev —
KAI, Kazan, 420111, Russia

² Tajik Technical University named after academic M.S. Osimi,
Dushanbe, 734042, Tajikistan

³ Branch of Lomonosov Moscow State University in the Republic of Tajikistan,
734025, Tajikistan

⁴ Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

⁵ Central Institute of Aviation Motors, Moscow, 111116, Russia

The paper presents the results of experimental investigation concerning the introduction of non-metallic nano-additives — pure dry fullerenes of C₆₀, C₇₀, C₈₄ grades — into liquid pure hydrazine. The study shows the effect of fullerenes on increasing the efficiency of liquid pure hydrazine by changing its density and thermal capacity through the relative coefficients of the system "(hydrazine + fullerenes) / hydrazine" at temperatures $T = (293...560)$ K and pressures $P = (0,101...49.01)$ MPa. The ways of increasing the efficiency of aircraft engines and power plants and aircraft themselves with the use of a new fuel type "hydrazine — fullerenes" have been developed. Findings of the study are new and necessary for calculations on making efficient jet engines and power plants of expendable and nonexpendable aircraft for ground, air, aerospace and space-based dual-use basing.

Keywords: hydrazine, fullerenes, natural convection, relative coefficients, density, thermal capacity, efficiency of reactive aircraft engines

REFERENCES

- [1] Gaponenko O.V. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2019, iss. 6. DOI: 10.18698/2308-6033-2019-6-1893
- [2] *NASA Strategic Technology Investment Plan. NASA, Office of the Chief Technologist, 2017.* Available at: https://www.nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/2017-8-1_stip_final-508ed.pdf (accessed May 24, 2018).
- [3] Kolomentsev A.I., Baykov A.V., Martynenko S.I., Yakutin A.V., Yanovskiy L.S., et al. *Izv. vuzov. Aviatsionnaya tekhnika (University Proceedings. Aeronautical engineering)*, 2010, no. 2, pp. 53–55.
- [4] Kovalev V.D., Gimbitskiy V.A., Gimbitskaya L.A., Marchenko E.I. K voprosu uvelicheniya dalnosti i prodolzhitelnosti poleta letatel'nogo apparata [On the issue of increasing the range and duration of flight of an aircraft]. *Nauka vchera, segodnya, zavtra: sb. statey po materialam 18–19 Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. 8 dekabrya 2014 g., Novosibirsk* [Science yesterday, today, tomorrow: coll. papers based on proceedings of the 18–19th International Scientific and Practical Conference. December 8, 2014, Novosibirsk]. Novosibirsk, Sibac Publ., 2014. no. 11–12 (17), pp. 30–36.

- [5] Fomin V.M., Zvegintsev V.I., Mazhul I.I., Shumskiy V.V. *Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika — Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 2010, vol. 54, no. 6, pp. 21–30.
- [6] Abdullin M.R., Davlatov N.B., Shigapov R.R. Analiz i klassifikatsiya putey sovershenstvovaniya zhidkostnykh raketnykh dvigateley odno- i mnogorazovogo ispolzovaniya na uglevodorodnykh i azotosoderzhashchikh goryuchikh i okhladitelyakh [Analysis and classification of ways to improve expendable and nonexpendable liquid rocket engines on hydrocarbon and nitrogen-containing fuels and coolers]. *Mater. dokl. mezhdunarod. molodezhnoy nauchnoy konf. "24-e Tupolevskie chteniya", posvyashchennye 130-letiyu so dnya rozhdeniya aviakonstruktora I.I. Sikorskogo. KNITU–KAI, Kazan, 7–8 noyabrya 2019 g.* [Proceedings of the International Youth Scientific Conference "24th Tupolev Readings" dedicated to the 130th anniversary of the birth of aircraft designer I.I. Sikorsky. KAI, Kazan, November 7–8, 2019]. Kazan, KAI Publ., 2019, vol. 2, pp. 314–320.
- [7] Averkov I.S., Raznoschikov V.V., Yanovskiy L.S. *Aviatsionnye dvigateli — Aviation Engines*, 2018, no. 1, pp. 73–81.
- [8] Averkov I.S., Demskaya I.A., Katkov R.E., Raznoschikov V.V., Samsonov D.A., Tupitsyn N.N., Yanovskiy L.S. *Kosmicheskaya tekhnika i tekhnologii — Space Engineering and Technology*, 2017, no. 4 (19), pp. 46–51.
- [9] Bolshakov G.F. *Khimiya i tekhnologiya komponentov zhidkogo raketnogo topliva* [Chemistry and technology of liquid propellant components]. Leningrad, Khimiya Publ., 1983, 320 p.
- [10] Khavkin A.V., Gulyaeva L.A., Belousov A.I. *Mir nefteproduktov. Vestnik neftyanykh kompaniy (The world of petroleum products. Bulletin of oil companies)*, 2015, no. 4, pp. 13–16.
- [11] Dubovkin N.F., Yanovskiy L.S., Shigabiev T.N. *Inzhenernye metody opredeleniya fiziko-khimicheskikh i ekspluatatsionnykh svoystv topliv* [Engineering methods for determining physicochemical and operational properties of fuels]. Kazan, Master Lain Publ., 2000, 378 p.
- [12] Yanovskiy L.S., ed. *Energoemkie goryuchie dlya aviatsionnykh i raketnykh dvigateley* [Energy-intensive fuels for aircraft and rocket engines]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2009, 400 p.
- [13] Danilov A.M. *Primenenie prisadok v toplivakh* [The use of additives in fuels]. St. Petersburg, Khimizdat Publ., 2010, 360 p.
- [14] Altunin V.A., Davlatov N.B., Zaripova M.A., Platonov E.N., Yanovskaya M.L. *Voenmekh. Vestnik BGTU (BSTU "Voenmeh" Bulletin)*, 2019, no. 5, pp. 424–429.
- [15] Altunin V.A., Davlatov N.B., Zaripova M.A., Safarov M.M., Platonov E.N., Yanovskaya M.L. Sposoby povysheniya effektivnosti teplofizicheskikh i termodinamicheskikh svoystv zhidkikh uglevodorodnykh i azotosoderzhashchikh goryuchikh dlya dvigateley i energoustanovok kosmicheskogo primeneniya [Methods for increasing the efficiency of thermophysical and thermodynamic properties of liquid hydrocarbon and nitrogen-containing fuels for engines and power plants for space applications]. *Trudy 53 chteniy, posvyashchennykh razrabotke nauchnogo naslediya i razvitiyu idey K.E. Tsiolkovskogo. Kaluga, 18–19 sentyabrya 2018 g.* [Proceedings of 53rd readings on the development of scientific heritage and the development of ideas of K.E. Tsiolkovsky. Kaluga, September 18–19, 2018]. RAS, Russian Cosmonautics Academy named after K.E. Tsiolkovsky. Kazan, Kazan University Publ., 2019, pp. 138–148.
- [16] Altunin V.A., Abdullin M.R., Platonov E.N., Davlatov N.B., Zaripova M.A., Safarov M.M., Yanovskaya M.L. Razrabotka sposobov povysheniya effektivnosti teplofizicheskikh i termodinamicheskikh svoystv zhidkikh

- uglevodorodnykh i azotosoderzhashchikh goryuchikh i okhladiteley dlya dvigateley giperzvukovykh, aerokosmicheskikh i kosmicheskikh letatelynykh apparatov [Development of methods for increasing the efficiency of thermophysical and thermodynamic properties of liquid hydrocarbon and nitrogen-containing fuels and coolers for engines of hypersonic, aerospace and spacecraft]. *Mater. dokl. 43-kh Akademicheskikh chteniy po kosmonavtike, posvyashchennykh pamyati akad. S.P. Koroleva i drugikh vydayushchikhsya otechestvennykh uchenykh — pionerov osvoeniya kosmicheskogo prostranstva*. [Proceedings of 43rd Academic readings on cosmonautics dedicated to the memory of academician S.P. Korolev and other prominent Russian scientists — pioneers of space exploration]. Moscow, BMSTU Publ., 2019, vol. 2, pp. 71–72.
- [17] Altunin V.A., Altunin K.V., Aliev I.N., Abdullin M.R., Davlatov N.B., Platonov E.N., Yanovskaya M.L. *Teplovye protsessy v tekhnike (Thermal processes in engineering)*, 2019, vol. 11, no. 10, pp. 453–479.
- [18] Altunin V.A., Davlatov N.B., Zaripova M.A., Safarov M.M., Aliev I.N., Yanovskaya M.L. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2019, iss. 10.
<http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2019-10-1922>
- [19] Altunin V.A., Davlatov N.B., Zaripova M.A., Safarov M.M., Aliev I.N., Yanovskaya M.L. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2019, iss. 11.
DOI: 10.18698/2308-6033-2019-11-1934
- [20] Altunin V.A., Davlatov N.B., Zaripova M.A., Aliev I.N., Yanovskaya M.L. *Vestnik KGTU im. A.N. Tupoleva (KAI Bulletin)*, 2019, no. 3, pp. 30–38.
- [21] Altunin V.A., Davlatov N.B., Zaripova M.A., Aliev I.N., Yanovskaya M.L. *Vestnik KGTU im. A.N. Tupoleva (KAI Bulletin)*, 2019, no. 3, pp. 39–51.
- [22] Sidorov L.N., Yurovskaya M.A., Borschevsky A.Ya., Trushkov I.V., Ioffe I.N., *Fullereny* [Fullerenes]. Moscow, Ekzamen Publ., 2005, 688 p.
- [23] Mekalova N.V. *Fullereny v rastvorakh* [Fullerenes in solutions]. Ufa, USPTU Publ., 2001, 107 p.
- [24] Shpilevskiy E.M. *Nauka i innovatsii — The Science and Innovations*, 2006, no. 5, pp. 32–38.
- [25] Terekhov A.I., Terekhov A.A. *Rossiyskiy khimicheskiy zhurnal — Russian Journal of General Chemistry*, 2006, vol. 50, no. 1, pp. 114–118.
- [26] Vityaz P.A., ed. *Fullereny i nanostruktury v kondensirovannykh sredakh. Sbornik nauchnykh statey* [Fullerenes and Nanostructures in Condensed Matter. Collected papers]. Minsk, A.V. Luikov Institute of Heat and Mass Transfer of the National Academy of Sciences of Belarus Publ., 2018, 299 p.
- [27] Altunin V.A., Altunin K.V., Aliev I.N., Gortyshov U.F., Dresvyannikov F.N., Obukhova L.A., Tarasevich S.E., Yanovskaya M.L. Analysis of investigations of electric fields in different media and conditions. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2012, vol. 85, no. 4, pp. 959–976.
- [28] Aliev I.N., Yurchenko S.O., Nazarova E.V. *Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal — Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2007, vol. 80, no. 5, pp. 64–69.

Altunin V.A., Dr. Sc. (Eng.), Professor, Department of Heat Engineering and Power Engineering, Academician of the Russian Cosmonautics Academy named after K. E. Tsiolkovsky (RCA), President of Kazan Regional Branch of RCA, Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev — KAI. e-mail: altspacevi@yahoo.com

Davlatov N.B., applicant for the degree of Candidate of Engineering Sciences, Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev — KAI.
e-mail: dnadzhibullo@bk.ru

Zaripova M.A., Dr. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, corresponding member of the Engineering Academy of the Republic of Tajikistan, Tajik Technical University named after academic M.S. Osimi. e-mail: mohira.zaripova@list.ru

Safarov M.M., Dr. Sc. (Eng.), Professor, Head of the Laboratory, Branch of Lomonosov Moscow State University in the Republic of Tajikistan, member of the Engineering Academy of the Republic of Tajikistan, member of the International Academy of Engineering, member of the International Academy of Refrigeration, Honored Worker of Science and Technology of the Republic of Tajikistan. e-mail: mahmadl@list.ru

Aliev I.N., Dr. Sc. (Phys.-Math.), Professor, Department of Physics, Bauman Moscow State Technical University. e-mail: alievprof@yandex.ru

Yanovskaya M.L., Cand. Sc. (Eng.), Junior Research Fellow, Central Institute of Aviation Motors. e-mail: maria-yanovskaya-ww@yandex.ru