

Экспериментальное исследование плотности и теплоемкости жидкого чистого гидразина

© 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 имени 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 плотности и теплоемкости жидкого чистого гидразина в условиях его естественной конвекции при нагреве до температур $T = 293 \dots 560$ К и давлении $p = 0,101$ МПа. Проведено сравнение полученных результатов с результатами других авторов, откуда выявлены неточности в их формулах расчета плотности и теплоемкости. На основе анализа полученных результатов экспериментальных исследований разработаны новые формулы, которые позволяют рассчитать с большой точностью плотность и теплоемкость жидкого чистого гидразина. Материалы статьи очень важны, так как жидкий чистый гидразин широко применяется в жидкостных ракетных двигателях одно- и многоразового использования, особенно в двигателях малой тяги и в микро-ЖРД одно- и многоразового использования, а для разработки и создания новых и перспективных двигателей необходимы точные формулы расчета плотности, теплоемкости и других теплофизических свойств этого горючего. Кроме того, результаты проведенных исследований и созданные авторами статьи новые точные формулы позволяют им проводить дальнейшие экспериментальные исследования, направленные на повышение плотности и улучшение других теплофизических свойств жидкого чистого гидразина, например, путем внедрения в него сухих фуллеренов, а также путем применения электростатических полей, что подробно будет освещено в следующих статьях авторов.

Ключевые слова: эксперимент, гидразин, естественная конвекция, плотность, теплоемкость, жидкостные ракетные двигатели

Введение. Жидкий чистый гидразин (N_2H_4) — уникальная азото-содержащая жидкость, которая применяется в качестве горючего в авиационно-космической технике и в качестве технологических жидкостей в различных областях промышленности [1–20]. В силу своих особенностей жидкий чистый гидразин может применяться в жидкостных ракетных двигателях (ЖРД), в ЖРД одно- и многоразового использования (ЖРДМИ) совместно с окислителями, а также без

окислителей — в ЖРД малой тяги и микро-ЖРД одно- и многоразового использования (ЖРДМТ, ЖРДМТМИ, м-ЖРД, м-ЖРДМИ). Например, при разложении 1 моля гидразина выделяется 46 кДж теплоты, поэтому он в основном используется в различных ЖРДМТ и в газогенераторах, где образующиеся при разложении газы достигают температуры 1400 К и развивают давление 1...2 МПа. В настоящее время гидразин наиболее широко применяется в различных м-ЖРД для эффективного управления орбитальными малыми и наноспутниками.

Одним из способов повышения эффективности двигателей и энергоустановок воздушных, аэрокосмических летательных аппаратов (ЛА) и космических ЛА (КЛА) одно- и многоразового использования является повышение эффективности топлива и горючего, в частности жидкого чистого гидразина [1–9, 17–20].

Для того чтобы повысить эффективность жидкого чистого гидразина, необходимо знать его первоначальные и индивидуальные теплофизические и термодинамические свойства (ТФС и ТДС). В справочной литературе, монографиях, учебных пособиях и учебниках приводятся различные формулы, которые применяют при различных тепловых и термодинамических расчетах в ходе проектирования и создания новых двигателей и энергоустановок ЛА и КЛА. Однако эти формулы никто не проверял на работоспособность и достоверность. В предыдущей статье [20] авторы опубликовали результаты своих экспериментальных исследований ТФС жидкого чистого гидразина в широком диапазоне значений давления и температуры в условиях его естественной конвекции.

При проектировании и создании новой техники наземного, воздушного, аэрокосмического и космического базирования одно- и многоразового использования и двойного назначения необходимо знать плотность и теплоемкость жидкого чистого гидразина. Поэтому целью статьи являются сравнение экспериментальных значений плотности и теплоемкости жидкого чистого гидразина с данными других авторов, проверка точности существующих формул расчета и создание новых.

Материалы данной статьи весьма актуальны и необходимы, так как они служат фундаментом и исходной площадкой для дальнейших исследований, направленных на повышение эффективности жидкого чистого гидразина, например, путем введения в него различных присадок, добавок, в том числе и наноматериалов — чистых сухих фуллеренов [5–14, 17–20], а также путем применения электростатических полей [15–20].

Плотность жидкого чистого гидразина. Анализ результатов экспериментов, проведенных авторами статьи, показал, что значения

плотности жидкого чистого гидразина при различных значениях температуры и давления $p = 0,101$ МПа практически полностью совпадают с данными, полученными другими авторами, такими, например, как Л. Одрит, Б. Огг, С. Сарнер, В.Н. Зрелов, Е.П. Серёгин, В.В. Ипатьев, В.П. Теодорович, а также Г.Ф. Большаков. В табл. 1 представлены значения плотности жидкого чистого гидразина, приведенные Г.Ф. Большаковым в работе [4] и полученные авторами статьи.

Таблица 1

Табличные значения плотности жидкого чистого гидразина из работы [4, табл. 83, с. 162], пересчитанные при температуре нагрева, как в эксперименте авторов статьи, и результаты экспериментальных исследований, проведенных авторами статьи

T, K	$\rho_{ж}, \text{кг/м}^3$		Относительная неопределенность (погрешность) $\Delta, \%$
	табличное	экспериментальное	
293,6	1010,1	1007,3	0,28
313,9	993,9	994,6	0,07
335,8	982,2	972,3	1,02
356,1	966,4	957,1	0,07

По данным табл. 1 видно, что относительная неопределенность (погрешность) имеет малый разброс значений $\Delta = 0,07 \dots 1,02 \%$, т. е. менее 1,1 %. Это свидетельствует о том, что экспериментальные исследования были проведены качественно и на высоком уровне.

Авторы статьи решили проверить, насколько точна формула расчета плотности жидкого чистого гидразина, приведенная в работе [4, табл. 84, с. 162]. Данная формула имеет вид

$$\rho_{ж} = 1025,3 - 8,715(T - 273), \quad (1)$$

где $\rho_{ж}$ — плотность жидкого чистого гидразина при $p = 0,101$ МПа, кг/м^3 ; T — текущее значение температуры нагрева жидкого чистого гидразина, К.

Оказалось, что вычисленные по формуле (1) значения плотности жидкого чистого гидразина очень сильно расходятся с табличными данными (табл. 2).

По данным табл. 2 видно, что относительная неопределенность (погрешность) при различной температуре имеет очень большой разброс значений: $\Delta = 0,03 \dots 4348,78 \%$. Очевидно, что формулу (1) применять нельзя.

Авторы статьи экспериментально исследовали плотность жидкого чистого гидразина при различном давлении, в том числе и при $p = 0,101$ МПа, а также при различных значениях температуры его нагрева. Результаты этого исследования были представлены в статье [20] в предыдущем номере данного журнала.

Таблица 2

Табличные значения плотности жидкого чистого гидразина из работы [4, табл. 83, с. 162] и результаты расчета по формуле (1)

T, К	$\rho_{ж}, \text{кг/м}^3$		Относительная неопределенность (погрешность) $\Delta, \%$
	табличное	расчетное	
273	1025	1025,3	0,03
293	1008	851,0	18,45
313	991	676,7	46,45
333	974	502,4	93,87
353	956	328,1	191,37
373	940	153,8	511,18
393	912	-20,5	4348,78
413	839	-194,8	361,05
433	879	-369,1	138,15

Далее проведено сравнение значений плотности жидкого чистого гидразина, полученных авторами статьи экспериментально, и значений, вычисленных по формуле (1). Результаты сравнения указанных значений оказались весьма противоречивыми (табл. 3).

Таблица 3

Значения плотности жидкого чистого гидразина, полученные авторами статьи при экспериментальных исследованиях, и расчетные значения, вычисленные по формуле (1)

T, К	$\rho_{ж}, \text{кг/м}^3$		Относительная неопределенность (погрешность) $\Delta, \%$
	экспериментальное	расчетное	
293,6	1007,3	845,771	19,10
313,9	994,6	668,85	48,67
335,8	972,3	478,3	103,28
356,1	957,1	301,084	217,88

Разброс значений относительной неопределенности (погрешности) здесь очень большой: $\Delta = 19,10 \dots 217,88 \%$. Очевидно, что формулу (1) применять нельзя.

Из работ [4–9, 17–20] известно, что жидкий чистый гидразин при $p = 0,101$ МПа имеет следующие тепловые характеристики: температура замерзания $T_{зам} = 274$ К, температура кипения $T_{кип} = 386,66$ К; температура начала разложения в инертной среде $T_{разл} = 393 \dots 413$ К.

Экспериментальные значения плотности при $T = 375,1$ К и более не занесены в табл. 3, поскольку при таких температурах в жидком чистом гидразине уже начинаются процессы кипения и разложения, а полученные значения плотности уже вызывают сомнения, так как они зависят не только от температуры нагрева, но и от плотности теплового потока q , от режима и времени кипения и разложения, а также от количества получаемого пара на рабочем участке [20].

На основе анализа результатов экспериментальных исследований, а также данных работы [4] авторами статьи была разработана и предложена новая формула для расчета плотности жидкого чистого гидразина при $p = 0,101$ МПа и различных значениях температуры нагрева:

$$\rho_{\text{ж}} = 1025,3 - 0,865(T - 273). \quad (2)$$

Для сравнения в табл. 4 приведены табличные данные автора работы [4, табл. 83, с. 162] о значениях плотности жидкого чистого гидразина при $p = 0,101$ МПа и различной температуре нагрева, а также данные, рассчитанные по новой формуле (2) авторов настоящей статьи.

Таблица 4

Табличные значения плотности жидкого чистого гидразина при $p = 0,101$ МПа и различной температуре его нагрева из работы [4, табл. 83, с. 162] и результаты расчета по новой формуле (2) авторов статьи

$T, \text{ К}$	$\rho_{\text{ж}}, \text{ кг/м}^3$		Относительная неопределенность (погрешность) $\Delta, \%$
	табличное	расчетное	
273	1025	1025,3	0,03
293	1008	1008,0	0
313	991	997,7	0,03
333	974	973,4	0,06
353	956	956,1	0,01
373	940	938,8	0,13
393	912	921,5	1,04
413	899	904,2	0,58
433	879	886,5	0,85

По данным табл. 4 видно, что относительная неопределенность (погрешность) имеет небольшой разброс значений: $\Delta = 0 \dots 1,04 \%$, т. е. данная формула очень хорошо описывает плотность жидкого чистого гидразина, поэтому ее можно использовать при различных расчетах.

Необходимо еще раз подчеркнуть, что при температуре более $T = 373$ К в гидразине начинаются процессы кипения и разложения, поэтому значения плотности гидразина при этих температурах являются сомнительными.

Проведем сравнение плотности жидкого чистого гидразина по результатам экспериментальных исследований авторов статьи и по результатам расчета по новой формуле (2) при $p = 0,101$ МПа и различной температуре нагрева (табл. 5).

Экспериментальные значения плотности жидкого чистого гидразина при $p = 0,101$ МПа и различной температуре его нагрева, полученные авторами статьи, и результаты расчета по новой формуле (2)

T, К	$\rho_{ж}$, кг/м ³		Относительная неопределенность (погрешность) Δ , %
	экспериментальное	расчетное	
293,6	1007,3	1007,481	0,02
313,9	994,4	989,922	0,45
335,8	972,3	970,988	0,14
356,1	957,1	953,419	0,39

Согласно данным табл. 5, относительная неопределенность (погрешность) имеет небольшой разброс значений: $\Delta = 0,02 \dots 0,45$ %, т. е. менее 0,5 %. Это еще раз доказывает, что новая формула (2) авторов статьи довольно точно дает правильные результаты.

По данным табл. 2 и 4 построим графики зависимости плотности жидкого чистого гидразина при $p = 0,101$ МПа и различных значениях температуры нагрева (рис. 1).

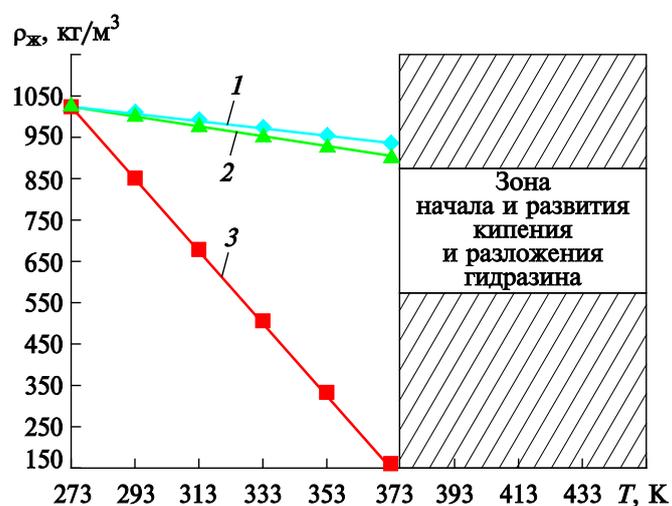


Рис. 1. Зависимость плотности жидкого чистого гидразина от температуры нагрева при $p = 0,101$ МПа:

1 — по табличным значениям автора работы [4, табл. 83, с. 162];
2 — по новой формуле (2) авторов статьи; 3 — по формуле (1)

На рис. 1 отчетливо видно, что формула (1) (см. линию 3) неверна, так как она не описывает реальные значения плотности жидкого чистого гидразина при $p = 0,101$ МПа. Результаты расчета по новой формуле (2) авторов статьи (см. линию 2) практически полностью совпадают с табличными данными из работы [4, табл. 83, с. 162] (см. линию 1).

При температуре нагрева более 373 К показана зона начала и развития кипения и разложения жидкого чистого гидразина при $p = 0,101$ МПа, поэтому экспериментальные исследования проводились до этой температуры.

По данным табл. 3 и 5 построим графики зависимости плотности жидкого чистого гидразина от температуры нагрева при $p = 0,101$ МПа (рис. 2) и наглядно покажем, что формула (1) не описывает реальные значения его плотности, полученные в экспериментальных исследованиях авторов статьи.

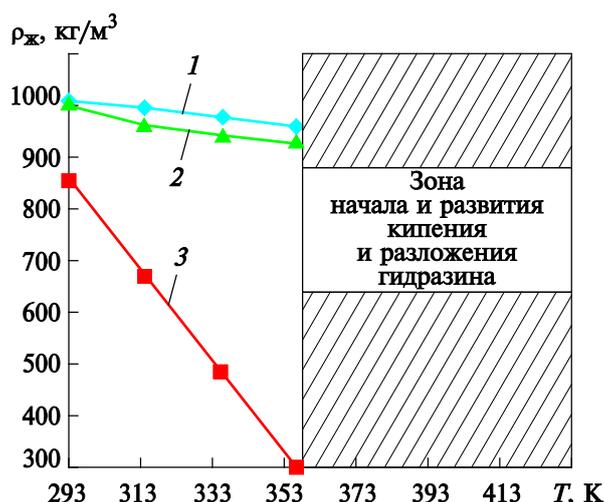


Рис. 2. Зависимость плотности жидкого чистого гидразина от температуры нагрева при $p = 0,101$ МПа:

1 — по результатам экспериментальных исследований авторов статьи;
2 — по новой формуле (2) авторов статьи; 3 — по формуле (1)

На рис. 2 хорошо видно, что в отличие от формулы (1) (см. линию 3) новая формула (2) авторов статьи (см. линию 2) довольно точно описывает результаты экспериментальных исследований, которые практически полностью совпадают с табличными данными автора работы [4, табл. 83, с. 162] (см. линию 1).

Таким образом, можно сделать выводы о том, что формула (1) неверна и при расчете плотности жидкого чистого гидразина необходимо применять формулу (2) авторов статьи.

Теплоемкость жидкого чистого гидразина. Анализ результатов экспериментальных исследований изобарной теплоемкости (далее — просто теплоемкости) жидкого чистого гидразина при различных значениях температуры и давления $p = 0,101$ МПа (табл. 6) показал, что они очень близки с результатами, полученными другими авторами, такими, например, как С. Сарнер, Л. Одрит, Б. Огг, В.Н. Зрелов,

Е.П. Серёгин, Я.М. Паушкин, а также с табличными данными Г.Ф. Большакова [4, табл. 91, с. 167, 168].

Неопределенность (погрешность) имеет небольшой разброс значений: $\Delta = 0,06 \dots 0,88 \%$, т. е. менее 0,9 %. Это свидетельствует о том, что эксперименты были проведены авторами настоящей статьи на высоком научно-техническом уровне.

Таблица 6

Экспериментальные значения теплоемкости жидкого чистого гидразина, полученные авторами статьи, и табличные значения из работы [4, табл. 91, с. 167, 168], пересчитанные при температуре нагрева, как в эксперименте авторов статьи

$T, \text{ К}$	$c_p, \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$		Относительная неопределенность (погрешность) $\Delta, \%$
	экспериментальное	табличное	
293,3	3,107	3,080	0,88
313,6	3,135	3,123	0,38
333,3	3,167	3,165	0,06
353,6	3,199	3,220	0,66

При разработке методики расчета теплоемкости жидкого чистого гидразина были проведены различные проверочные расчеты по существующим формулам. Так, по данным автора работы [4, табл. 92, с. 168], теплоемкость жидкого чистого гидразина в условиях его естественной конвекции при давлении $p = 0,101 \text{ МПа}$ и значениях температуры $T = 273 \dots 353 \text{ К}$ можно рассчитать по следующим формулам:

1) для $T = 273 \dots 343 \text{ К}$

$$c_p = A - BT + CT^2, \quad (3)$$

где $A = 3,22570$; $B = 2,8474413 \cdot 10^{-3}$; $C = 7,9676 \cdot 10^{-6}$;

2) для $T = 283 \dots 443 \text{ К}$

$$c_p = A + BT, \quad (4)$$

где $A = 0,52317$; $B = 2,97206 \cdot 10^{-3}$.

Проведен расчет по формуле (3), где значения температуры были взяты из работы [4, табл. 91, с. 167, 168]. Результаты расчетов для сравнения сведены в табл. 7, где также приведены табличные данные о теплоемкости жидкого чистого гидразина из работы [4, табл. 91, с. 167, 168].

Относительная неопределенность (погрешность) здесь имеет большой разброс значений: $\Delta = 64,13 \dots 161,81 \%$, т. е. более 160 %.

Согласно данным табл. 7, формула (3) дает очень большую неопределенность (погрешность) (рис. 3).

Таблица 7

Табличные значения теплоемкости жидкого чистого гидразина из работы [4, табл. 91, с. 167, 168] и результаты расчета по формуле (3)

T, К	c_p , кДж/(кг·К)		Относительная неопределенность (погрешность) Δ , %
	табличное	расчетное	
273	3,043	1,854	64,13
283	3,058	1,782	71,60
293	3,077	1,707	80,26
303	3,095	1,631	89,76
313	3,117	1,554	100,58
323	3,138	1,475	112,75
333	3,162	1,394	126,83
343	3,188	1,312	142,99
353	3,215	1,228	161,81

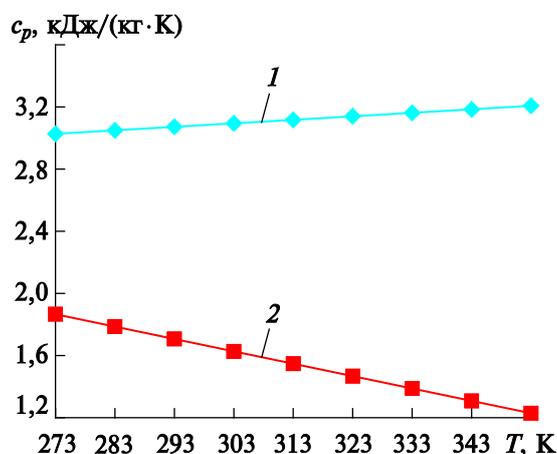


Рис. 3. Зависимость теплоемкости жидкого чистого гидразина от температуры нагрева:

- 1 — по табличным значениям из работы [4, табл. 91, с. 167, 168];
- 2 — по результатам расчета по формуле (3) при температуре нагрева из работы [4, табл. 91, с. 167, 168]

На рис. 3 видно, что результаты, полученные при расчете по формуле (3), не соответствуют табличным данным. Необходимо создавать новую формулу.

Далее проведем анализ формулы (4) (табл. 8 и рис. 4).

Относительная неопределенность (погрешность) здесь очень большая: $\Delta = 104,52 \dots 128,11$ %, т. е. более 128 %.

Табличные значения теплоемкости жидкого чистого гидразина из работы [4, табл. 91, с. 167, 168] и результаты расчета по формуле (4)

T, К	c_p , кДж/(кг·К)		Относительная неопределенность (погрешность) Δ , %
	табличное	расчетное	
273	3,043	1,334	128,11
283	3,058	1,364	124,19
293	3,077	1,394	120,73
303	3,095	1,423	117,49
313	3,117	1,453	114,59
323	3,138	1,483	115,73
333	3,162	1,513	108,99
343	3,188	1,543	106,61
353	3,215	1,572	104,52

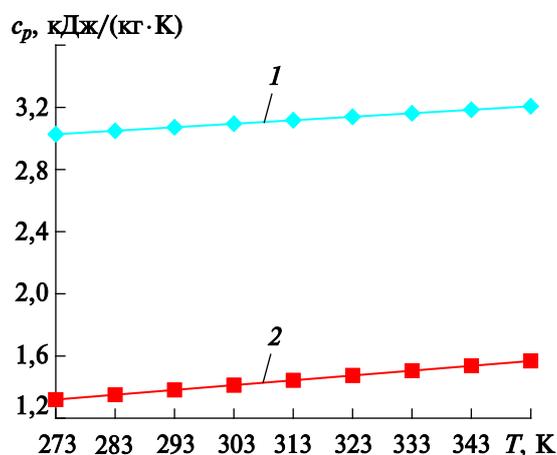


Рис. 4. Зависимость теплоемкости жидкого чистого гидразина от температуры нагрева:

1 — по табличным значениям из работы [4, табл. 91, с. 167, 168];
 2 — по результатам расчета по формуле (4) при температуре нагрева из работы [4, табл. 91, с. 167, 168]

По данным табл. 8 и рис. 4 отчетливо видно, что формула (4) не-точна.

Далее проведем сравнительный анализ экспериментальных данных, полученных авторами настоящей статьи, и данных, приведенных в работе [4].

В табл. 9 приведены значения c_p , полученные в эксперименте авторами данной статьи, и значения, рассчитанные по формуле (3) при температуре, как в эксперименте авторов статьи.

Экспериментальные значения теплоемкости жидкого чистого гидразина, полученные авторами статьи, и расчетные значения, вычисленные по формуле (3) при температуре нагрева, как в эксперименте

T, К	c_p , кДж/(кг·К)		Относительная неопределенность (погрешность) Δ , %
	экспериментальное	расчетное	
293,3	3,107	1,705	82,23
313,6	3,135	1,549	102,39
333,3	3,167	1,392	127,54
353,6	3,199	1,223	161,57

Согласно данным табл. 9, формула (3) [4, табл. 92, с. 168] также является неработоспособной. Для большей наглядности покажем эти расхождения на рис. 5.

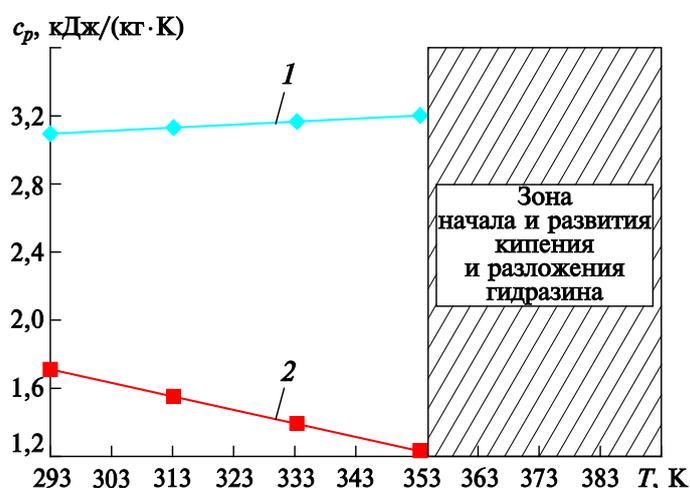


Рис. 5. Зависимость теплоемкости жидкого чистого гидразина от температуры нагрева:

1 — по экспериментальным значениям, полученным авторами статьи;
 2 — по расчетным значениям, вычисленным по формуле (3) при температуре нагрева, как в эксперименте

На рис. 5 отчетливо видно, что значения c_p , полученные по формуле (3), не совпадают с экспериментальными данными, т. е. формула (3) также неточна.

Далее проведем анализ экспериментальных данных, полученных авторами статьи, и результатов расчетов по формуле (4) (табл. 10 и рис. 6).

Экспериментальные значения теплоемкости жидкого чистого гидразина, полученные авторами статьи, и расчетные значения, вычисленные по формуле (4) при температуре нагрева, как в эксперименте

T, К	c _p , кДж/(кг·К)		Относительная неопределенность (погрешность) Δ, %
	экспериментальное	расчетное	
293,3	3,107	1,395	122,72
313,6	3,135	1,455	115,46
333,3	3,167	1,514	119,18
353,6	3,199	1,574	103,24

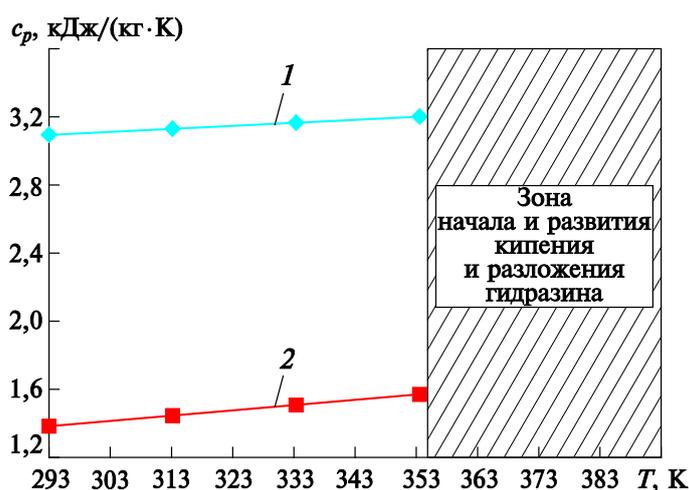


Рис. 6. Зависимость теплоемкости жидкого чистого гидразина от температуры нагрева:

1 — по экспериментальным значениям, полученным авторами статьи;
 2 — по расчетным значениям, вычисленным по формуле (4) при температуре нагрева, как в эксперименте авторов статьи

Относительная неопределенность (погрешность) здесь очень большая: Δ = 103...122,72 %, т. е. формулу (4) применять нельзя.

Таким образом, из анализа данных табл. 10 и рис. 6 можно сделать общий вывод о том, что формула (4) также не дает точных результатов. Необходима новая формула для расчета.

Авторами статьи была разработана новая формула для расчета теплоемкости c_p жидкого чистого гидразина при различных значениях температуры и давлении p = 0,101 МПа, которая имеет вид

$$c_p = 3,043 + (T - 273)[0,1(T - 273) + 14] \cdot 10^{-4}. \quad (5)$$

Для сравнения в табл. 11 приведены значения c_p, взятые из работы [4, табл. 91, с. 167, 168], значения, рассчитанные по формуле (5) при различной температуре.

Табличные значения теплоемкости жидкого чистого гидразина из работы [4, табл. 91, с. 167, 168] и результаты расчета по новой формуле (5) авторов статьи

T, К	c_p , кДж/(кг·К)		Относительная неопределенность (погрешность) Δ , %
	табличное	расчетное	
273	3,043	3,043	0
283	3,058	3,058	0
293	3,077	3,075	0,07
303	3,095	3,094	0,03
313	3,117	3,115	0,06
323	3,138	3,138	0
333	3,162	3,163	0,03
343	3,188	3,190	0,06
353	3,215	3,219	0,12

По данным табл. 11 хорошо видно, что новая формула (5) авторов статьи работоспособна, так как относительная неопределенность (погрешность) $\Delta = 0 \dots 0,07$ %, т. е. менее 0,1 %. При этом отпадает необходимость в оформлении сравнительных графиков, так как обе линии практически будут проходить почти через одинаковые рабочие точки.

В табл. 12 приведены для сравнения результаты экспериментальных исследований c_p авторов статьи с результатами расчета по новой формуле (5) при температуре нагрева, как в эксперименте.

Таблица 12

Экспериментальные значения теплоемкости жидкого чистого гидразина, полученные авторами статьи, и расчетные значения, вычисленные по новой формуле (5) при температуре нагрева, как в эксперименте

T, К	c_p , кДж/(кг·К)		Относительная неопределенность (погрешность) Δ , %
	экспериментальное	расчетное	
293,3	3,107	3,076	1,01
313,6	3,135	3,116	0,61
333,3	3,167	3,164	0,09
353,6	3,199	3,221	0,69

По данным табл. 12 видно, что новая формула (5) авторов статьи довольно точно описывает результаты их экспериментальных исследований c_p . Относительная неопределенность $\Delta = 0,09 \dots 1,01$ %, т. е. менее 1,1 %.

Поскольку новая формула (5) авторов статьи эффективно работает при $p = 0,101$ МПа в интервале значений температуры $T = 273,0 \dots 353,6$ К и является универсальной, отпадает необходимость в модернизации формулы (4).

Таким образом, можно сделать следующие выводы:

- формулы (3), (4) автора работы [4, табл. 92, с. 168] по расчету теплоемкости c_p жидкого чистого гидразина при $p = 0,101$ МПа и различных значениях температуры неработоспособны, т. е. их применять нельзя;

- новая формула (5) авторов статьи является довольно точной, поэтому ее можно (и необходимо) применять при $T = 293...353$ К и $p = 0,101$ МПа в тепловых расчетах c_p жидкого чистого гидразина для различных двигателей и энергоустановок ЛА, КЛА.

Заключение. Проведение экспериментальных исследований плотности и теплоемкости жидкого чистого гидразина при различных значениях температуры и давлении $p = 0,101$ МПа в условиях его естественной конвекции позволило авторам:

- сравнить полученные результаты с результатами исследований, выполненных другими авторами;

- установить, что результаты авторов статьи практически полностью совпадают с табличными данными таких авторов, как Л. Одрит, Б. Огг, С. Сарнер, В.Н. Зрелов, Е.П. Серёгин, В.В. Ипатьев, В.П. Теодорович, Я.М. Паушкин, и с табличными данными Г.Ф. Большакова [4, табл. 83, с. 162 и табл. 91, с. 167, 168];

- обнаружить в работе [4] неточные формулы расчета ТФС жидкого чистого гидразина: плотности — в табл. 84 на с. 162; теплоемкости — в табл. 92 на с. 168;

- разработать новые формулы, расчет по которым дает значения $\rho_{ж}$ и c_p , практически совпадающие с результатами экспериментальных исследований и с табличными данными Л. Одрит, Б. Огг, С. Сарнера, В.Н. Зрелова, Е.П. Серёгина, В.В. Ипатьева, В.П. Теодоровича, Я.М. Паушкина и с данными автора работы [4], приведенными в табл. 83 (см. с. 162) — о плотности и в табл. 91 (см. с. 167, 168) — о теплоемкости жидкого чистого гидразина.

Материалы статьи позволяют авторам проводить следующие этапы экспериментальных исследований, связанных с повышением ТФС и ТДС жидкого чистого гидразина путем внедрения в него различных сухих фуллеренов, а также с применением электростатических полей, что подробно будет раскрыто в следующих статьях авторов.

Применение новых и точных формул расчета плотности и теплоемкости жидкого чистого гидразина повысит качество расчетов при проектировании и создании новых отечественных двигателей и энергоустановок с повышенными характеристиками надежности, безопасности, эффективности, выживаемости, неуязвимости, экономичности и экологичности для ЛА одно- и многоразового использования наземного, воздушного, аэрокосмического и космического базирования двойного 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 микродвигательных установок. *Изв. вузов. Авиационная техника*, 2010, № 2, с. 53–55.
- [4] Большаков Г.Ф. *Химия и технология компонентов жидкого ракетного топлива*. Ленинград, Химия, 1983, 320 с.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] Яновский Л.С., ред. *Энергоемкие горючие для авиационных и ракетных двигателей*. Москва, Физматлит, 2009, 400 с.
- [9] Данилов А.М. *Применение присадок в топливах*. 3-е изд. Санкт-Петербург, Химиздат, 2010, 360 с.
- [10] Сидоров Л.Н., Юровская М.А., Борщевский А.Я., Трушков И.В., Иоффе И.Н. *Фуллерены*. Москва, Экзамен, 2005, 688 с.
- [11] Мекалова Н.В. *Фуллерены в растворах*. Уфа, Изд-во «Уфимский гос. нефтяной техн. ун-т», 2001, 107 с.
- [12] Шпилевский Э.М. Фуллерены — новые молекулы для новых материалов. *Наука и инновации*, 2006, № 5, с. 32–38.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 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.*
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 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. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2019-10-1922>

Статья поступила в редакцию 11.11.2019

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. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2019, вып. 11. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2019-11-1934>

Алтунин Виталий Алексеевич — д-р техн. наук, профессор кафедры «Теплотехника и энергетическое машиностроение» Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева — КАИ, академик Российской академии космонавтики им. К.Э. Циолковского (РАКЦ), президент Казанского регионального отделения РАКЦ (КазРО РАКЦ).
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. акад. 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

© 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 Academician M.S. Osimi,
Dushanbe, 734042, Tajikistan

³ Branch of Lomonosov Moscow State University, Dushanbe, 734025, Tajikistan

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

⁵ P. I. Baranov Central Institute of Aviation Motor Development,
Moscow, 111116, Russia

The paper presents the results of experimental investigation concerning density and thermal capacity of liquid pure hydrazine undergoing natural convection when heated to $T = 293 \dots 560$ K and subjected to pressure $p = 0.101$ MPa. We compare the results obtained to results published previously elsewhere, revealing inaccuracies in equations used to compute density and thermal capacity. Analysing the experimental results obtained enabled us to develop new equations that ensure highly accurate computations of density and thermal capacity of liquid pure hydrazine. This submission becomes extremely important, as pure liquid hydrazine is widely used in expendable and non-expendable liquid rocket engines, especially in expendable and non-expendable low-thrust liquid rocket engines and liquid micro-rocket engines, which makes it impossible to develop and build novel promising engines without accurate equations for computing density, thermal capacity and other thermophysical properties of the fuel. Moreover, the investigation results and the innovative accurate equations derived by the authors allow us to conduct other experimental studies dedicated to increasing the density and other thermophysical properties of liquid pure hydrazine, for example, by means of introducing dry fullerenes into the hydrazine or employing electrostatic fields, which will be further described in detail in the papers to follow.

Keywords: experiment, hydrazine, natural convection, density, thermal capacity, computation, liquid rocket engines

REFERENCES

- [1] Gaponenko O.V. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2019, iss. 6 (90).
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., Telichkin D.S., Tsygenkhagen Sh. *Izv. vuzov. Aviatsionnaya tekhnika (University Proceedings. Aeronautical engineering)*, 2010, no. 2, pp. 53–55.
- [4] Bolshakov G.F. *Khimiya i tekhnologiya komponentov zhidkogo raketnogo topliva* [Chemistry and manufacturing of liquid rocket fuel components]. Leningrad, Khimiya Publ., 1983, 320 p.

- [5] Khavkin A.V., Gulyaeva L.A., Belousov A.I. *Mir nefteproduktov. Vestnik neftyanykh kompaniy — World of Oil Products. The Oil Companies' Bulletin*, 2015, no. 4, pp. 13–16.
- [6] 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.
- [7] Dubovkin N.F., Yanovskiy L.S., Shigabiev T.N., Galimov F.M., Ivanov V.F. *Inzhenernye metody opredeleniya fizikokhimicheskikh i ekspluatatsionnykh svoystv topliv* [Engineering methods of estimating physical, chemical and performance properties of propellants]. Kazan, Master Layn Publ., 2000, 378 p.
- [8] Yanovskiy L.S., ed. *Energoemkie goryuchie dlya aviatsionnykh i raketnykh dvigateley* [Powerful fuels for aerospace engines]. Moscow, FIZMATLIT Publ., 2009, 400 p.
- [9] Danilov A.M. *Primenenie prisadok v toplivakh* [Using fuel additives]. 3rd ed. St. Petersburg, Khimizdat Publ., 2010, 360 p.
- [10] Sidorov L.N., Yurovskaya M.A., Borshchevskiy A.Ya., Trushkov I.V., Ioffe I.N. *Fullereny* [Fullerenes]. Moscow, Ekzamen Publ., 2005, 688 p.
- [11] Mekalova N.V. *Fullereny v rastvorakh* [Fullerenes in solutions]. Ufa, Ufa State Petroleum Technological University Publ., 2001, 107 p.
- [12] Shpilevskiy E.M. *Nauka i Innovatsii — Science and Innovation*, 2006, no. 5, pp. 32–38.
- [13] Terekhov A.I., Terekhov A.A. *Rossiyskiy khimicheskiy zhurnal — Russian Journal of General Chemistry*, 2006, vol. 50, no. 1, pp. 114–118.
- [14] Vityaz P.A., ed. *Fullereny i nanostruktury v kondensirovannykh sredakh* [Fullerenes and nanostructures in condensed media. Proc.]. Sb. nauch. st. Minsk, A.V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of NAS of Belarus Publ., 2018, 299 p.
- [15] Altunin V.A., Altunin K.V., Aliev I.N., Gortyshov U.F., Dresvyannikov F.N., Obukhova L.A., Tarasevich S.E., Yanovskaya M.L. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2012, vol. 85, no. 4, pp. 959–976.
- [16] Aliev I.N., Yurchenko S.O., Nazarova E.V. *Inzhenernofizicheskiy zhurnal — Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2007, vol. 80, no. 5, pp. 64–69.
- [17] 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 of improving thermophysical and thermodynamical efficiency of liquid hydrocarbon and nitrogenated fuels for engines and power plants intended for space use]. *Tr. 53-kh chteniy, posvyashchennykh razrabotke nauchnogo naslediya i razvitiyu idey K.E. Tsiolkovskogo (Kaluga, 18–19 sentyabrya 2018 g.), RAN, RAKTs* [Proc. of 53rd Readings dedicated to developing the scientific legacy and ideas of K.E. Tsiolkovsky (Kaluga, September 18–19th, 2018), Russian Academy of Sciences, Interregional public organization Russian Academy of Cosmonautics named after K.E. Tsiolkovsky]. Kazan, Kazan University Publ., 2019, pp. 138–148.
- [18] 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 letatelnykh apparatov* [Developing methods of improving thermophysical and

- thermodynamical efficiency of liquid hydrocarbon and nitrogenated fuels and coolants for engines of hypersonic, aerospace and orbital aircraft]. *Materialy dokl. 43-kh Akademicheskikh chteniy po kosmonavtike, posvyashchennykh pamyati akad. S.P. Korolva i drugikh vydayushchikhsya otechestvennykh uchenykh pionerov osvoeniya kosmicheskogo prostranstva* [Proc. of Academic Readings on Cosmonautics devoted to the memory of S.P. Korolev, Academician, and other distinguished Russian scientists, space exploration pioneers]. Moscow, BMSTU Publ., 2019, vol. 2, pp. 71–72.
- [19] Altunin V.A., Davlatov N.B., Zaripova M.A., Platonov E.N., Yanovskaya M.L. *Zhurnal Voennemk. Vestnik BGTU — VOENMEH. Journal of Baltic State Technical University*, 2019, no. 55, pp. 424–429.
- [20] 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. Available at: <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2019-10-1922>

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

Davlatov N.B., applicant for a Cand. Sc. (Eng.) degree, Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev. e-mail: dnadzhibullo@bk.ru

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

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

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

Yanovskaya M.L., Cand. Sc. (Eng.), Research Assistant, P.I. Baranov Central Institute of Aviation Motor Development. e-mail: maria-yanovskaya-ww@yandex.ru