

Экспериментальное исследование теплофизических свойств жидкого чистого гидразина при различных температурах и давлениях

© 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. акад. М.С. Осими, Душанбе, 734042, Таджикистан

³ Филиал МГУ им. М.В. Ломоносова, Душанбе, 734025, Таджикистан

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

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

Рассмотрены области применения жидкого чистого гидразина и его производных. Ввиду отсутствия полных сведений о его теплофизических свойствах проведены экспериментальные исследования в широком диапазоне значений давления и температуры в условиях естественной конвекции. Для проведения таких исследований созданы экспериментальные установки и рабочие участки, на которых были реализованы различные современные методы измерений. Благодаря этому с высокой точностью удалось определить теплофизические свойства жидкого чистого гидразина. Полученные результаты представлены в виде таблиц. Разработаны пути повышения эффективности жидкого чистого гидразина, что позволит увеличить эффективность жидкостных ракетных двигателей и энергоустановок одно- и многократного использования для летательных аппаратов воздушного, аэрокосмического и космического базирования.

Ключевые слова: жидкий чистый гидразин, производные гидразина, теплофизические свойства, естественная конвекция, экспериментальные исследования, жидкостные ракетные двигатели

Введение. Жидкий чистый гидразин и его производные широко применяются в различных областях науки и техники, промышленности, энергетики, сельского хозяйства и медицины. Однако до сих пор нет точных сведений о его теплофизических свойствах (ТФС) в широком диапазоне значений давления и температуры. В научно-технической литературе в основном приводятся сведения о плотности, теплоемкости, теплопроводности и вязкости жидкого чистого гидразина только при нормальном давлении и небольших его значениях.

В связи с этим целью данной работы является проведение экспериментальных исследований с получением информации о ТФС жид-

кого чистого гидразина в широком диапазоне значений давления и температуры при его естественной конвекции. Данная цель весьма актуальна, так как расширенные и уточненные сведения о ТФС этого жидкого горючего необходимы для проектирования, создания и эксплуатации новых отечественных двигателей и энергоустановок (ЭУ) с повышенными характеристиками для летательных аппаратов (ЛА) одно- и многоразового использования воздушного, аэрокосмического и космического базирования двойного назначения.

Области применения жидкого чистого гидразина и его производных. Жидкий чистый гидразин широко используется в качестве азотосодержащего горючего в авиационно-космической технике, особенно в жидкостных ракетных двигателях (ЖРД), в ЖРД малой тяги (ЖРДМТ), в микро-ЖРД (м-ЖРД) одно- и многоразового использования (ЖРДМИ, ЖРДМТМИ, м-ЖРДМИ), а также в других областях науки, промышленности и народного хозяйства [1–24].

Гидразин (N_2H_4) — это однокомпонентное ракетное топливо, или моногорючее, которое было открыто и создано почти 150 лет назад, а наиболее эффективное его применение относится к началу развития реактивной авиации и ракетной техники. Гидразин представляет собой бесцветную, дымящую на воздухе жидкость, сильно гигроскопичную и хорошо растворяющуюся в воде, спиртах, аминах и других полярных растворителях. Это эндотермичное соединение, поэтому имеет малую стабильность, легко воспламеняется и легко разлагается при нагревании и в присутствии катализаторов с образованием аммиака, водорода и азота.

Производные гидразина (алкилгомологи), или гидразиновые горючие, — это несимметричный диметилгидразин ($(CH_3)_2N_2H_2$), гидразингидрат ($N_2H_4H_2O$), монометилгидразин (NH_2NHCH_3), аммиак (NH_3). Кроме того, гидразин применяется либо в смеси с метилгидразином (или с монометилгидразином), при этом получается горючее «Аэрозин-50», которое широко используется в США, либо в смеси с аммиаком, а также в составе двухкомпонентных и гибридных топлив или в составе некоторых жидких окислителей.

В годы Второй мировой войны гидразин применялся в Германии в качестве одного из компонентов топлива для подводных лодок, реактивных истребителей «Мессершмитт Me-163» (C-Stoff, содержащий до 30 % гидрата гидразина) и ракет «Фау-2» (B-Stoff, 75 % гидразина).

Несимметричный диметилгидразин широко используется в авиационной и ракетно-космической технике: на французских боевых самолетах «Мираж-111»; на отечественных ракетах-носителях (РН) «Космос», «Циклон», «Протон»; на американских РН семейства «Титан»; на французских РН семейства «Ариан»; на японских РН семей-

ства «N»; на китайских РН семейства «Большой Поход»; в двигательных установках пилотируемых кораблей и автоматических спутников, орбитальных и межпланетных станций, многоразовых космических кораблей «Буран» (РФ) и «Спейс Шаттл» (США). Другие алкилгомологи гидразина широко применяются в различных комбинациях ракетных топлив и горючих.

Все гидразиновые горючие (и охладители) токсичны и опасны для человека. Однако несмотря на это, из-за их особенных технических свойств такие горючие продолжают эффективно использовать, и в первую очередь для двигателей и ЭУ ЛА и космических ЛА (КЛА) одно- и многоразового использования воздушного, аэрокосмического и космического базирования. При разложении 1 моля гидразина выделяется 46 кДж теплоты, поэтому его в основном применяют в ЖРДМТ, ЖРДМТМИ и в газогенераторах (ГГ), где образующиеся при разложении газы достигают температуры 1400 К и развивают давление 1...2 МПа. В настоящее время гидразин также широко используется в м-ЖРД и м-ЖРДМИ для эффективного управления орбитальными малыми и наноспутниками [3].

Кроме того, гидразиновые горючие (и охладители), их производные, а также их смеси с другими различными веществами в наше время нашли применение и в земных условиях [8–31]:

- в конверсионных ЖРД, ЖРДМТ и ЭУ многоразового использования (ЖРДМИ, ЖРДМТМИ, ЭУМИ) — для добычи тяжелых битумных нефтей, решения научно-технических задач при доводке существующих и создании новых жидкостных и гибридных двигателей и их охлаждаемых и неохлаждаемых камер сгорания, конструкторских планов создания систем экстренного торможения для крупногабаритных экранопланов и их поворотных систем (в положении «на плаву»), проведения эффективных исследований по свойствам горячей плазмы, продолжения и расширения научной и учебной работы;

- медицине — при создании новых лекарственных препаратов;

- сельском хозяйстве и биологии — для регуляторов роста растений и при создании различных химикатов;

- малой энергетике — при создании и эксплуатации воздушно-гидразиновых низкотемпературных топливных элементов (батарей — электрохимических генераторов) разных габаритных размеров и мощности, для получения электрического тока и его использования в различных объектах и отраслях промышленности, включая транспорт;

- большой энергетике — для восстановления кислорода в воде, применяемой для питания котлов;

- атомной энергетике — для осуществления процесса переработки ядерного топлива (в качестве восстанавливающих агентов);

- химической промышленности — для получения пластмасс, резины, взрывчатых веществ, восстановления золота, серебра, платиновых металлов, меди из разбавленных растворов солей, восстановления карбональной группы альдегидов и других веществ, очистки промышленных газов от CO_2 и меркаптанов, получения промежуточных продуктов и красителей;

- машиностроении и других отраслях промышленности — для защиты от коррозии водяных и паровых циркуляционных трубопроводов (а именно: парогенераторов, систем охлаждения, систем отопления), удаления кислорода при обработке воды, консервации выведенного из эксплуатации оборудования, обеспечения топливом (гидразингидратом) в энергоблоках глубоководных аппаратов, спускаемых на глубину 6 км (например, в энергоблоке «Океан»), получения рабочего тела при температурах до 650°C (при разложении гидразин-гидрата в ГГ на азот, водород, аммиак и водяной пар), используемого в качестве теплоносителя вторичного контура турбины замкнутого типа, работающей по циклу Ренкина.

В связи с этим необходимо иметь наиболее полные данные о ТФС жидкого чистого гидразина, для чего должны быть проведены широкомасштабные экспериментальные исследования.

Экспериментальное исследование ТФС жидкого чистого гидразина. Для проведения исследований были созданы экспериментальные установки и рабочие участки (в статье не приведены), которые позволили с достаточной точностью определить ТФС жидкого чистого гидразина в интервале значений давления $p = 0,101...49,010$ МПа и в интервале значений температуры $T = 293...673$ К. Расчет неопределенности (погрешности) полученных экспериментальных данных о ТФС жидкого чистого гидразина выполняли согласно методикам, приведенным в работах [8–40].

Для определения *плотности* жидкого чистого гидразина методом гидростатического взвешивания была создана экспериментальная установка. Используя теорию погрешностей физических величин, определяли относительную неопределенность (погрешность) измерения плотности жидкого чистого гидразина. Общая относительная неопределенность (погрешность) измерения плотности по данной методике на экспериментальной установке при $\alpha = 0,95$ составляет 0,1 %. Расчеты показали, что доверительная граница неопределенности (погрешности) измерений плотности в относительной форме при $\alpha = 0,95$ составляет 0,03 %, методическая неопределенность (погрешность) — 0,02 %, инструментальная — 0,07 %, общая относительная неопределенность (погрешность) измерений — 0,12 %. Результаты исследования неопределенности (погрешности) жидкого чистого гидразина представлены в табл. 1.

Таблица 1

Экспериментальные значения плотности ρ , кг/м³, гидразина (х. ч. 99,5 %) в зависимости от температуры и давления

T, К	p , МПа						
	0,101	4,91	9,81	19,62	29,43	39,24	49,01
293,6	1007,3	1017,8	1025,2	1032,4	1045,9	1058,8	1068,9
313,9	994,4	999,4	1007,4	1014,5	1028,3	1041,2	1051,1
335,8	972,3	979,2	986,7	994,6	1007,9	1020,5	1030,2
356,1	957,1	960,5	968,9	976,9	990,5	1002,9	1012,5
375,7	—	943,2	951,4	959,4	973,2	985,3	994,4
398,4	—	922,9	931,2	940,9	954,1	966,7	975,2
416,9	—	906,7	915,5	924,1	938,4	950,2	959,1
442,6	—	883,5	892,7	901,3	915,9	927,4	936,4
468,1	—	861,5	860,5	879,2	893,4	904,9	913,9
493,5	—	839,7	847,2	857,3	871,3	864,2	892,0
514,6	—	820,4	828,2	838,9	853,2	884,2	873,7
538,9	—	798,5	809,4	817,5	831,9	843,6	852,4
560,7	—	780,2	787,4	798,4	813,2	824,2	832,3

Для измерения удельной теплоемкости жидкого чистого гидразина и его растворов и смесей при высоких значениях температуры и давления применяли экспериментальную установку, работающую по методу монотонного разогрева. Расчеты показали, что доверительная граница неопределенности (погрешности) измерений удельной теплоемкости в относительной форме при $\alpha = 0,95$ составляет 0,45 %, методическая неопределенность (погрешность) — 1,2 %, инструментальная — 1,8 %. Общая относительная неопределенность (погрешность) измерений изобарной удельной теплоемкости составляет 3,5 %. Результаты исследования удельной теплоемкости жидкого чистого гидразина приведены в табл. 2.

Таблица 2

Экспериментальные значения удельной теплоемкости C_p , Дж/(кг·К), гидразина (х. ч. 99,5 %) в зависимости от температуры и давления

T, К	p , МПа						
	0,101	4,91	9,81	19,62	29,43	39,24	49,01
293,3	3106,5	3085,3	3070,2	3040,1	3021,8	3000,7	2970,7
313,6	3135,2	3120,1	3094,4	3065,4	3050,4	3020,4	3003,0
333,3	3166,6	3140,9	3125,6	3100,7	3081,8	3051,6	3020,4
353,6	3198,9	3177,3	3157,2	3126,0	3111,7	3075,7	3052,7
373,8	—	3200,6	3180,5	3151,4	3133,9	3107,4	3071,1
393,4	—	3235,5	3212,6	3180,7	3160,8	3140,5	3106,4
413,5	—	3264,3	3240,2	3220,1	3193,7	3165,7	3130,6
433,4	—	3290,1	3270,9	3250,4	3220,8	3192,4	3156,1
453,9	—	3320,9	3295,6	3280,7	3249,6	3214,1	3179,4
473,5	—	3350,8	3325,3	3305,1	3275,9	3238,4	3212,8
493,3	—	3375,6	3350,8	3330,4	3300,7	3264,6	3243,1
513,7	—	3403,9	3380,4	3355,2	3328,4	3290,5	3268,6
533,2	—	3430,1	3410,7	3380,4	3352,2	3312,6	3290,5
553,9	—	3460,1	3443,5	3419,3	3380,6	3340,7	3320,2
573,4	—	3490,4	3470,4	3449,5	3409,4	3369,4	3340,7

Для проведения исследований *теплопроводности* жидкого чистого гидразина при различных значениях температуры и давления по методу регулярного теплового режима первого рода был разработан и создан экспериментальный стенд — цилиндрический бикалориметр. Для измерения теплопроводности при повышенных и высоких значениях температуры прибор был снабжен электропечью. Для повышения качества исследований был разработан и создан автоматизированный теплофизический комплекс, который подключается к цилиндрическому бикалориметру и состоит из диалогового вычислительного комплекса ПК, устройства сопряжения с объектом, нормирующих усилителей с блоком вентиляторов, блока тиристорных регуляторов мощности, стендов для исследования ТФС и эффективных параметров теплопередачи.

Технические средства комплекса обеспечивают реализацию следующих функций: сбор и обработка информации о ходе теплофизического эксперимента; формирование и вывод на терминал алфавитно-цифровой информации о ходе эксперимента и представление ее в графическом виде; автоматическое программное управление исполнительными механизмами и поддержание заданных температурных режимов; обмен информацией между стендом и вычислительной машиной по интерфейсу ИРПС.

Минимальная конфигурация комплекса позволяет осуществить ввод четырех термопарных сигналов, четырех потенциальных сигналов с погрешностью преобразования не более 0,1 % и временем преобразования 150 мкс, формирование и вывод следующих сигналов (через 150 мкс); 12 дискретных сигналов типа «открытый коллектор», управление регулятором мощности до 2 кВт и управление регулятором мощности до 400 Вт.

Для проверки правильности постановки экспериментов контрольные измерения были проведены с воздухом и толуолом. Теплопроводность воздуха при атмосферном давлении измерялась в диапазоне значений температуры 293...573 К. Стенд также проверялся на воспроизводимость данных, полученных для воздуха. С этой целью теплопроводность воздуха измерялась в разное время и при различной толщине исследуемого слоя.

Предварительные опыты и расчеты показали, что максимальная общая относительная неопределенность (погрешность) экспериментальных данных о теплопроводности при доверительной вероятности $\alpha = 0,95$ не превышает 4,6 %. Убедившись, что стенд качественно и количественно воспроизводит значения теплопроводности воздуха и толуола в зависимости от температуры и давления, далее приступали к измерению теплопроводности исследуемых образцов.

Расчеты неопределенностей (погрешностей) теплопроводности жидкого чистого гидразина показали, что доверительная граница не-

определенности (погрешности) теплопроводности, измеренной методом регулярного теплового режима первого рода в относительной форме при $\alpha = 0,95$, составляет 1,8 %, методическая неопределенность (погрешность) — 0,3 %, инструментальная — 1,2 %, общая относительная неопределенность (погрешность) измерений — 3,3 %. Результаты исследования теплопроводности жидкого чистого гидразина приведены в табл. 3.

Таблица 3

Экспериментальные значения теплопроводности $\lambda \cdot 10^3$, Вт/(м·К), гидразина (х. ч. 99,5 %) в зависимости от температуры и давления

T, К	p, МПа						
	0,101	4,91	9,81	19,62	29,43	39,24	49,01
293,3	358,3	380,3	410,3	441,4	470,7	504,5	536,7
313,4	338,2	360,5	390,6	423,7	460,3	488,9	520,0
333,6	318,1	341,5	374,2	408,5	440,4	477,0	508,6
353,1	298,4	321,8	354,7	390,2	421,8	460,0	498,5
373,2	270,8	302,7	338,6	372,6	407,7	442,6	480,4
393,3	250,2	286,2	321,8	356,7	394,4	427,8	463,7
413,7	—	268,3	301,5	340,2	375,0	410,2	452,6
433,4	—	247,3	283,6	321,3	360,3	395,4	438,2
453,6	—	232,4	268,2	304,8	344,5	380,6	422,4
473,3	—	211,6	250,0	289,6	327,7	365,7	408,3
493,7	—	193,0	223,5	272,0	310,4	350,4	394,6
513,2	—	186,7	216,4	250,2	298,5	332,5	380,0
533,8	—	157,2	200,3	237,5	280,0	316,9	363,5
553,2	—	138,8	180,7	220,1	263,4	300,0	350,6
593,1	—	100,5	144,0	193,6	235,4	268,7	320,0
613,5	—	80,8	126,2	170,3	218,7	250,0	307,0
633,9	—	63,5	107,5	150,0	200,1	235,4	298,5
653,9	—	47,3	88,6	135,8	174,4	220,5	268,8
673,2	—	30,8	67,4	114,8	150,4	190,8	244,8

Для экспериментального исследования динамической вязкости жидкого чистого гидразина была разработана и собрана экспериментальная установка, реализующая метод, при котором капилляр внесен в зону высоких температур, а стеклянный вискозиметр с ртутью — в зону комнатной температуры. Этот метод позволяет проводить опыты в жидкой и газообразной фазах, при низких и высоких температурах и различных давлениях. На данной установке можно измерять динамическую вязкость жидкого чистого гидразина и его растворов в интервале от температуры плавления до температуры термического разложения веществ при давлении до 100 МПа.

Экспериментальная установка в основном состоит из вискозиметрического прибора, системы термостатирования, создания и измерения температуры, системы создания, поддержания и измерения

давления, схемы автоматического измерения времени истечения и из пережимного сосуда.

Для проверки правильности постановки экспериментов по определению динамической вязкости были проведены контрольные измерения с водой. Расчеты показали, что максимальная общая относительная неопределенность (погрешность) экспериментальных данных по нахождению динамической вязкости контрольных образцов при доверительной вероятности $\alpha = 0,95$ в среднем не превышает 1,01 %. Убедившись, что установка качественно и количественно воспроизводит значения вязкости воды в зависимости от температуры и давления, приступали к измерению динамической вязкости жидкого чистого гидразина при различных значениях давления и температуры. Неопределенность (погрешность) измерений динамической вязкости жидкого чистого гидразина при доверительной вероятности $\alpha = 0,95$ составила 1,6 %.

Расчеты показали, что доверительная граница неопределенности (погрешности) измерений динамической вязкости в относительной форме при $\alpha = 0,95$ составляет 1,8 %, методическая неопределенность (погрешность) — 0,45 %, инструментальная — 0,35 %. Общая относительная неопределенность (погрешность) измерений динамической вязкости составляет 2,6 %.

Результаты исследования динамической вязкости жидкого чистого гидразина приведены в табл. 4.

Таблица 4

Экспериментальные значения динамической вязкости $\eta \cdot 10^6$, Па·с, гидразина (х. ч. 99,5 %) в зависимости от температуры и давления

T, К	p, МПа					
	0,101	9,81	19,62	29,43	39,24	49,01
292,7	964,5	1060,9	1166,2	1259,1	1348,4	1427,3
313,4	748,3	838,1	921,9	977,1	1054,7	1117,5
334,6	601,3	673,3	753,7	806,2	864,3	924,5
352,7	498,7	562,7	617,4	682,3	731,4	785,3
374,2	—	448,4	510,2	568,4	607,1	664,7
393,7	—	367,3	426,7	468,7	514,7	565,6
414,4	—	311,3	360,9	396,2	442,5	487,5
434,5	—	263,1	303,1	340,4	384,6	426,4
451,9	—	228,4	263,3	294,5	335,1	368,1
474,5	—	196,3	229,4	262,7	301,7	334,7
494,1	—	172,4	201,3	233,3	270,1	302,4
511,7	—	156,2	174,5	206,7	236,4	265,1

Пути повышения эффективности применения жидкого чистого гидразина и его производных. Одним из способов повышения эффективности ЖРД, ЖРДМИ является повышение эффективности жидких горючих и охладителей [1–7, 24–42]. Повышение эффективности жидкого чистого гидразина (и его производных) возможно путем:

- внедрения в него различных неметаллических присадок и добавок, а также металлических добавок (после включения двигателя и в ходе его работы);
- смешения его с другими существующими и перспективными жидкими энергоемкими горючими и охладителями (перед полетом или в ходе полета);
- использования жидкого чистого гидразина при поддержании его зоны критических давлений (для увеличения коэффициента теплоотдачи в 2-3 раза за счет его ТФС, что очень важно для систем охлаждения двигателей);
- применения электростатических полей (для увеличения коэффициента теплоотдачи для полной предтопливной подготовки, электрораспыла горючего при выходе из строя насосной системы) и др. [31–42].

Среди неметаллических добавок особое место занимают перспективные нанодобавки в виде сухих чистых фуллеренов, благодаря которым можно увеличивать плотность и улучшить другие ТФС жидких горючих и охладителей [8–31, 35–42]. Увеличение плотности жидкого горючего очень важно для ЖРД и ЛА, КЛА, так как повышается эффективность не только двигателей, но и самих ЛА, КЛА (возрастает дальность полета, появляется возможность увеличения полезной нагрузки при выведении на космическую орбиту и др.).

Уже известны результаты влияния фуллеренов на улучшение ТФС жидких углеводородных горючих и охладителей, созданы новые углеводородные горючие и топлива с внедренными в них фуллеренами. Однако влияние фуллеренов на ТФС жидкого чистого гидразина и его производных остается пока неизвестным. Авторами статьи были проведены всесторонние экспериментальные исследования, посвященные изучению влияния чистых сухих фуллеренов на улучшение ТФС жидкого чистого гидразина в условиях его естественной конвекции, результаты которых будут опубликованы в следующих статьях данного журнала.

Заключение. В результате экспериментальных исследований получены полные и расширенные данные о ТФС жидкого чистого гидразина в широком диапазоне значений давления и температуры в условиях его естественной конвекции (см. табл. 1–4). Эти данные довольно точны и могут служить справочными материалами. Благодаря журналу эти материалы доступны, и ими могут воспользоваться студенты и аспиранты, молодые ученые и инженеры, разработчики и конструкторы современной и перспективной отечественной техники

наземного, воздушного, аэрокосмического и космического базирования одно- и многоразового использования. Такая техника должна будет иметь повышенный ресурс, большую надежность, безопасность, эффективность, выживаемость, экономичность и экологичность. Это позволит совершенствовать и модернизировать существующую технику, а также проектировать и создавать новую и перспективную отечественную технику одно- и многоразового использования двойного назначения с улучшенными характеристиками. Авторами статьи разработаны новые и уточненные методики расчета теплофизических параметров жидкого чистого гидразина при различных значениях давления и температуры. Эти методики будут опубликованы в следующих выпусках журнала.

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] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] Яновский Л.С., ред. *Энергоемкие горючие для авиационных и ракетных двигателей*. Москва, Физматлит, 2009, 400 с.
- [8] Сафаров М.М., Картавченко А.В., Зарипова М.А. Температурная и концентрационная зависимости плотности водных растворов гидразина. *Теплофизика высоких температур*, 1993, т. 31, № 1, с. 301–312.
- [9] Зарипова М.А. Экспериментальное исследование теплопроводности водных растворов триметилгидразина в зависимости от температуры и давления. *Измерительная техника*, 2013, № 2, с. 36–40.
- [10] Pannetier G., Margineanu F. Diagrammes de Solidification et masses volumiques de melanges azoture d'hydraziniumhydrazines divorcement hydrates. *Bull. Soc. Chem. France*, 1972, no. 10, pp. 3725–3728.
- [11] Zoirov H.A., Tagoev S.A., Safarov M.M., Toshov A.G., Zaripova M.A. Influence nanocatal to exchange of isobaric heat capacity ternary systems (hydrazine hidrate+water+oxide aluminium) in dependence temperature and pressures.

- Program and Extended abstracts, of 31th Thermal conductivity conference, 19th International Thermal expansions symposium, June 26–30, 2011, Saguenay. Quebec, Canada, 2011, p. 18.*
- [12] Zoirov H.A., Safarov M.M., Zaripova M.A., Toshov A.F., Tagoev S.A. Influence nanodimensions oxide titanium (TiO_2) to exchange specific heat capacity hydrazinehydrate. *Conference book*. Budapest, 2011, pp. 212–214.
- [13] Zoirov H.A., Safarov M.M., Tagoev S.A., Zaripova M.A., Tilloeva T.R. Influence catalis (14,5 % Ni (Al_2O_3)) and pressures to exchange thermodynamics properties hydrazine hydrate. *Book of abstracts, 19 European Conference on Thermo-physical Properties, August 28 – September 1, 2011*. Thessaloniki, Greece, p. 29.
- [14] Zoirov H.A., Safarov M.M., Zaripova M.A., Anaqulov M.M., Toshov A.G. *Applications: Influence of Carbon nanotube to exchange thermo-physical properties of hydrazinehydrate (rocket fuel) in dependence temperature and pressures*. Shanghai, China, 2011, pp. 456–457.
- [15] Safarov M.M., Zaripova M.A., Rajabov F.S., Turgunboev M.T. Heat conductivity of organic liquids containing Oxygen and Water Mixtures of Hydrazine in Wide State. *Thermal Conductivity, 29 oct. — 1 Nov. 1995, USA, Oak Ridge*, p. 126.
- [16] Safarov M.M., Zaripova M.A., Rajabov F.S., Turgunboev M.T. Thermophysical Feature of Water Mixtures Mixed up With Hydrazine under various Temperature and Pressures. *14th European Conference on Thermophysical properties, Proceedings, September 16–19, 1996, Lyon, France*, pp. 1141–1146.
- [17] Safarov M.M., Zaripova M.A., Tilloeva T.R., Zoirov H.A. Density, Viscosity of Water Hydrazine hydrate solutions in dependence of Temperatures and Pressures. *Thermodynamic Water Solutions*. Berlin, 2008, p. 181.
- [18] Safarov M.M., Zaripova M.A., Tilloeva T.R., Zoirov H.A. Thermal conductivity and thermodynamic properties of water, ethyl hydrazine solutions. *Proceedings of the 30 International Thermal Conductivity Conference*. Pittsburg, Pennsylvania, USA, 2009, pp. 841–847.
- [19] Safarov M.M., Kartavchenko A.V., Zaripova M.A. Viscosity and density of aqueous solutions of hydrazine and phenylhydrazine as functions of temperature at atmospheric pressure. *J. of Engineering Physics and Thermophysics*, 1995, vol. 68, no. 2, pp. 252–254.
- [20] Safarov M.M., Zaripova M.A. Density dependence of heat conductivity of aqueous hydrazine solutions within wide ranges of temperature and pressure. *J. of Engineering Physics and Thermophysics*, 1995, vol. 68, no. 3, pp. 390–394.
- [21] Safarov M.M., Zaripova M.A., Rajabov F.S. Thermal capacity of aqueous aeroxine solutions as a function of temperature and pressure. *J. Measurement Techniques*, 1996, vol. 39, no. 5, pp. 540–544.
- [22] Safarov M.M., Zaripova M.A., Rajabov F.S. Equation state systems (aeroxine+water) to the specific heat capacity data. *23th ICTP, October 26–29, 1997, USA, Pittsburg, PA*, p. 441.
- [23] Safarov M.M., Zaripova M.A., Tilloeva T.R., Zoirov H.A., Aminov Sh.A. Density and of hydrazinesubmissions under various temperatures and pressures equations state. *18th European Conference on Thermophysical Properties*. France, 2008, p. 23.
- [24] Данилов А.М. *Применение присадок в топливах*. 3-е изд. Санкт-Петербург, Химиздат, 2010, 360 с.
- [25] Сидоров Л.Н., Юровская М.А., Борщевский А.Я., Трушков И.В., Иоффе И.Н. *Фуллерены*. Москва, Экзамен, 2005, 688 с.
- [26] Мекалова Н.В. *Фуллерены в растворах*. Уфа, Изд-во «Уфимский гос. нефтяной техн. ун-т», 2001, 107 с.

- [27] Шпилевский Э.М. Фуллерены — новые молекулы для новых материалов. *Наука и инновации*, 2006, № 5, с. 32–38.
- [28] Витязь П.А., Шпилевский Э.М. Фуллерены в матрицах различных веществ. *ИФЖ*, 2012, т. 85, № 4, с. 718–724.
- [29] 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.
- [30] 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.
- [31] Шушков С.В., Генарова Т.Н., Лещевич В.В., Пенязьков О.Г., Гусакова С.В., Егоров А.С., Говоров М.И., Присмотров Ю.А. Повышение скорости горения топлива при добавлении углеродных наноразмерных частиц. *ИФЖ*, 2012, т. 85, № 4, с. 797–803.
- [32] Алтунин В.А., Алтунин К.В., Алиев И.Н., Гортышов Ю.Ф., Дресвянников Ф.Н., Обухова Л.А., Тарасевич С.Э., Яновская М.Л. Анализ исследований электрических полей в различных средах и условиях. *ИФЖ*. 2012, т. 85, № 4, с. 881–896.
- [33] Алиев И.Н. О возможности использования электромагнитного поля для очистки от газовых пузырей сеток в топливных системах ракет. *Магнитная гидродинамика*, 1996, № 3, с. 376–378.
- [34] 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.
- [35] 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.
- [36] Алтунин В.А., Давлатов Н.Б., Зарипова М.А. Разработка способа повышения теплофизических свойств жидкого углеводородного горючего и охладителя. *Авиакосмические технологии. Тез. докл. 19-й Междунар. научно-техн. конф. и школы молодых ученых, аспирантов и студентов. Воронеж, 7–8 июня 2018 г.* Воронеж, Элист, 2018, с. 17–18.
- [37] Алтунин В.А., Давлатов Н.Б., Зарипова М.А. Анализ путей повышения эффективности жидких горючих для космических двигателей и энергоустановок. *Новые технологии, материалы и оборудование Российской авиакосмической отрасли. Материалы докл. Всерос. научно-практ. конф. с международным участием, посвященной 130-летию со дня рождения выдающегося авиаконструктора А.Н. Туполева. Казань, 8–10 августа 2018 г.* Казань, Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2018, т. 1, с. 326–330.
- [38] Алтунин В.А., Давлатов Н.Б., Зарипова М.А. Некоторые пути увеличения теплофизических и термодинамических свойств жидкого азотосодержащего горючего и охладителя. *Проблемы и перспективы развития двигателестроения. Материалы докл. Междунар. научно-техн. конф., посвященной генеральному конструктору аэрокосмической техники академику Н.Д. Кузнецову. Самара, 12–14 сентября 2018 г.* Самара, Изд-во Самарского ун-та, 2018, с. 138.
- [39] Алтунин В.А., Абдуллин М.Р., Платонов Е.Н., Давлатов Н.Б., Зарипова М.А., Сафаров М.М., Яновская М.Л. Разработка способов повышения эффектив-

- ности 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.
- [40] Алтунин В.А., Абдуллин М.Р., Давлатов Н.Б., Шигапов Р.Р., Яновская М.Л. Исследование возможности интенсификации теплоотдачи к жидким и газообразным углеводородным и азотосодержащим горючим и охладителям. *Сб. тез. докл. Всерос. научно-техн. конф. молодых ученых и специалистов «Авиационные двигатели и силовые установки»*. ФГУП «ЦИАМ им. П.И. Баранова», Москва, 28–30 мая 2019 г. Москва, Изд-во ФГУП «ЦИАМ им. П.И. Баранова», 2019, с. 316–317.
- [41] Алтунин В.А., Абдуллин М.Р., Давлатов Н.Б. Разработка методик расчета тепловых процессов в рубашках охлаждения жидкостных ракетных двигателей на жидких и газообразных горючих и охладителях. *Гагаринские чтения — 2019. Сб. тез. докл. 45-й Междунар. молодеж. науч. конф.* Москва, МАИ, 2019, с. 150.
- [42] 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. *Военмех. Вестник БГТУ*, 2019, № 55, с. 424–429.

Статья поступила в редакцию 18.10.2019

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 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>

Алтунин Виталий Алексеевич — д-р техн. наук, профессор кафедры Теплотехники и энергетического машиностроения 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, член-корреспондент Инженерной академии Республики Таджикистан, Таджикский технический университет им. академика М.С. Осими. 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 Международ-

В.А. Алтунин, Н.Б. Давлатов, М.А. Зарипова, М.М. Сафаров, И.Н. Алиев, М.Л. Яновская

ной 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 study of thermophysical properties of liquid pure hydrazine at various temperatures and pressures

© 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, Dushanbe, 734025, Tajikistan

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

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

The paper studies the areas of application of liquid pure hydrazine and its derivatives. In order to obtain the complete information about its thermophysical properties, we carried out the experimental studies in a wide range of pressure and temperature parameters under conditions of natural convection. To conduct such studies, experimental facilities and work sites were constructed on which various modern methods were implemented. As a result, it was possible to determine the thermophysical properties of liquid pure hydrazine with high accuracy. Findings are presented in tables. Moreover, we developed methods to improve the efficiency of using liquid pure hydrazine, which will increase the efficiency of liquid rocket engines and single-and-multi-use power plants for air-launched, aerospace-based and space-based aircraft.

Keywords: *liquid pure hydrazine, hydrazine derivatives, thermophysical properties, natural convection, experimental studies, 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., et al. *Izv. vuzov. Aviatsionnaya tekhnika (University Proceedings. Aeronautical engineering)*, 2010, no. 2, pp. 53–55.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] Dubovkin N.F., Yanovskiy L.S., Shigabiev T.N., Galimov F.M., Ivanov V.F. *Inzhenernye metody opredeleniya fiziko-khimicheskikh i ekspluatatsionnykh*

- svoistv topliv [Engineering methods for determining physicochemical and operational properties of fuels]. Kazan, Master Lain Publ., 2000, 378 p.
- [7] Yanovskiy L.S., ed. *Energoemkie goryuchie dlya aviatsionnykh i raketykh dvigateley* [Energy-intensive fuels for aircraft and rocket engines]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2009, 400 p.
- [8] Safarov M.M., Kartavchenko A.V., Zaripova M.A. *Teplofizika vysokikh temperatur — High Temperature*, 1993, vol. 31, no. 1, pp. 301–312.
- [9] Zaripova M.A. *Izmeritelnaya tekhnika — Measurement Techniques*, 2013, no. 2, pp. 36–40.
- [10] Pannetier G., Margineanu F. *Bull. Soc. Chem. France*, 1972, no. 10, pp. 3725–3728.
- [11] Zoirov H.A., Tagoev S.A., Safarov M.M., Toshov A.G., Zaripova M.A. Influence nanocatal to exchange of isobaric heat capacity ternary systems (hydrazine hydrate+water+oxide aluminium) in dependence temperature and pressures. *Program and Extended abstracts, of 31th Thermal conductivity conference, 19th International Thermal expansions symposium, June 26-30, 2011, Saguenay, Quebec, Canada*, p.18.
- [12] Zoirov H.A., Safarov M.M., Zaripova M.A., Toshov A.F., Tagoev S.A. Influence nanodimensions oxide titanium (TiO₂) to exchange specific heat capacity hydrazinehydrate. *Conference book*, Budapest, 2011, pp. 212–214.
- [13] Zoirov H.A., Safarov M.M., Tagoev S.A., Zaripova M.A., Tilloeva T.R. Influence catalis (14,5 % Ni (Al₂O₃)) and pressures to exchange thermodynamics properties hydrazine hydrate. *Book of abstracts, 19 European Conference on Thermo-physical Properties, August 28-September1, 2011, Thessaloniki, Greece*, p. 29.
- [14] Zoirov H.A., Safarov M.M., Zaripova M.A., Anaqulov M.M., Toshov A.G. *Applications: Influence of Carbon nanotube to exchange thermo- physical properties of hydrazinehydrate (rocket fuel) in dependence temperature and pressures*, Shanghai, China, July, 2011, pp. 456–457.
- [15] Safarov M.M., Zaripova M.A., Rajabov F.S., Turgunboev M.T. Heat conductivity of organic liquids containing oxygen and water mixtures of hydrazine in wide state. *Thermal Conductivity, 29 oct. – 1 Nov. 1995, USA, Oak Ridge*, p. 126.
- [16] Safarov M.M., Zaripova M.A., Rajabov F.S., Turgunboev M.T. Thermo physical feature of water mixtures mixed up with hydrazene under various temperature and pressures. *14th European Conference on Thermophysical properties, Proceedings, September 16–19, 1996, Lyon, France*, pp. 1141–1146.
- [17] Safarov M.M., Zaripova M.A., Tilloeva T.R., Zoirov H.A. Density, viscosity of water hydrazine hydrate solutions in dependence of temperatures and pressures. *Thermodynamic Water Solutions*, Berlin, 2008, p. 181.
- [18] Safarov M.M., Zaripova M.A., Tilloeva T.R., Zoirov H.A. Thermal conductivity and thermodynamic properties of water, ethyl hydrazine solutions. *Proceedings of the Thirtieth International thermal conductivity conference*, 2009, Pittsburg, Pennsylvania, USA, pp. 841–847/
- [19] Safarov M.M., Kartavchenko A.V., Zaripova M.A. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 1995, vol. 68, no. 2, pp. 252–254.
- [20] Safarov M.M., Zaripova M.A. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 1995, vol. 68, no. 3, pp. 390–394.
- [21] Safarov M.M., Zaripova M.A., Rajabov F.S. *J. Measurement Techniques*, 1996, vol. 39, no. 5, pp. 540–544.
- [22] Safarov M.M., Zaripova M.A., Rajabov F.S. Equation state systems (aerozine +water) to the specific heat capacity data. *23th ICTP, PA, October 26–29 1997, USA, Pittsburg*, p. 441.

- [23] Safarov M.M., Zaripova M.A., Tilloeva T.R., Zoirov H.A., Aminov Sh.A. Density and of hydrazinesubmissions under various temperatures and pressures equations state. *Book of abstracts. 18th European conference on thermo physical properties*. France, 2008, p. 23.
- [24] Danilov A.M. *Primenenie prisadok v toplivakh* [The use of additives in fuels]. 3rd ed. St. Petersburg, Khimizdat Publ., 2010, 360 p.
- [25] Sidorov L.N., Yurovskaya M.A., Borschevsky A.Ya., Trushkov I.V., Ioffe I.N. *Fullereny* [Fullerenes]. Moscow, Ekzamen Publ., 2005, 688 p.
- [26] Mekalova N.V. *Fullereny v rastvorakh* [Fullerenes in solutions]. Ufa, Ufa State Oil Technical Univrsity Publ., 2001, 107 p.
- [27] Shpilevskiy E.M. *Nauka i innovatsii — Science and Innovation*, 2016, no. 5, pp. 32–38.
- [28] Vityaz P.A., Shpilevskiy E.M. *Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal — Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2012, vol. 85, no. 4, pp. 718–724.
- [29] Terekhov A.I., Terekhov A.A. *Rossiyskiy khimicheskiy zhurnal — Russian Journal of General Chemistry*, 2006, vol. 50, no. 1, pp. 114–118.
- [30] Vitiaz 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.
- [31] Shushkov S.V., Genarova T.N., Leshchevich V.V., Penyazkov O.G., Gusakova S.V., Egorov A.S., Govorov M.I., Prismotrov Yu.A. *Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal — Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2012, vol. 85, no. 4, pp. 797–803.
- [32] Altunin V.A., Altunin K.V., Aliev I.N., Gortyshov Yu.F., Dresvyannikov F.N., Obukhova L.A., Tarasevich S.E., Yanovskaya M.L. *Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal — Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2012, vol. 85, no. 4, pp. 881–896.
- [33] Aliev I.N. *Magnitnaya gidrodinamika — Magnetohydrodynamics*, 1996, no. 3, pp. 376–378.
- [34] 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.
- [35] 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 and 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* [Proceedings of 53 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.
- [36] Altunin V.A., Davlatov N.B., Zaripova M.A. Razrabotka sposoba povysheniya teplofizicheskikh svoystv zhidkogo uglevodorodnogo goryuchego i okhladitelya [Development of a method for improving thermophysical properties of liquid hydrocarbon fuel and a cooler]. *Aviakosmicheskie tekhnologii: Tez. dokl. 19-y Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. i shkoly molodykh uchenykh, aspirantov i studentov, g. Voronezh, 7–8 iyunya 2018*. [Aerospace technology: Abstracts of the 19th International scientific and technical conf. and schools of young

- scientists, graduate students and students, Voronezh, June 7–8, 2018]. Voronezh, Elist Publ., 2018, pp. 17–18.
- [37] Altunin V.A., Davlatov N.B., Zaripova M.A. Analiz putey povysheniya effektivnosti zhidkikh goryuchikh dlya kosmicheskikh dvigateley i energoustanovok [Analysis of methods for increasing the efficiency of liquid fuels for space engines and power plants]. *Novye tekhnologii, materialy i oborudovanie Rossiyskoy aviakosmicheskoy otrasli: Materialy dokl. Vseros. nauch.-prakt. konf. s mezhdunarodnym uchastiem, posvyashchennoy 130-letiyu so dnya rozhdeniya vydayushchegosya aviakonstruktora A.N. Tupoleva, Kazan, 8–10 avg. 2018*. [New technologies, materials and equipment of the Russian aerospace industry: Proceedings of the All-Russian scientific and practical conf. with international participation dedicated to the 130th anniversary of the birth of the outstanding aircraft designer A.N. Tupolev, Kazan, August 8–10, 2018]. Kazan, KSTU Publ., 2018, vol. 1, pp. 326–330.
- [38] Altunin V.A., Davlatov N.B., Zaripova M.A. Nekotorye puti uvelicheniya teplofizicheskikh i termodinamicheskikh svoystv zhidkogo azotosoderzhashchego goryuchego i okhladitelya [Some methods for increasing thermophysical and thermodynamic properties of liquid nitrogen-containing fuel and cooler]. *Problemy i perspektivy razvitiya dvigatelestroeniya: Materialy dokl. Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf., posvyashchennoy generalnomu konstrukturu aerokosmicheskoy tekhniki akademiku N.D. Kuznetsovu, Samara, 12–14 sent. 2018* [Problems and prospects of engine development: Proc. of Int. scientific and technical conf. dedicated to the general designer of aerospace engineering, academician N.D. Kuznetsov, Samara, September 12–14, 2018]. Samara, Samara University Publ., 2018, p. 138.
- [39] Altunin V.A., Abdullin M.R., Platonov E.N., Davlatov N.B., Zaripova M.A., Safarov M.M., Yanovskaya M.L. 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 43 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.
- [40] Altunin V.A., Abdullin M.R., Davlatov N.B., Shigapov R.R., Yanovskaya M.L. Issledovanie vozmozhnosti intensivatsii teplotdachi k zhidkim i gazoobraznym uglevodorodnym i azotosoderzhashchim goryuchim i okhladitelyam [Investigation of the possibility of intensifying heat transfer to liquid and gaseous hydrocarbon and nitrogen-containing fuels and coolers]. *Sbornik tezisov dokladov Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii molodykh uchenykh i spetsialistov «Aviatsionnye dvigatelya i silovye ustanovki»* [Collection of abstracts of the All-Russian scientific and technical conf. of young scientists and specialists “Aircraft engines and power plants”]. FGUP «TsIAM im. P.I. Baranova», 28–30 maya 2019 g., Moskva [Central Institute of Aviation Motors, May 28–30, 2019, Moscow]. Moscow, CIAM Publ., 2019, pp. 316–317.
- [41] Altunin V.A., Abdullin M.R., Davlatov N.B. Razrabotka metodik rascheta teplovykh protsessov v rubashkakh okhlazhdeniya zhidkostnykh raketnykh dvigateley na zhidkikh i gazoobraznykh goryuchikh i okhladitelyakh [Development of methods for calculating thermal processes in cooling jackets of liquid rocket engines using liquid and gaseous fuels and coolers]. *Gagarinskie*

chteniya – 2019: Sb. tez. dokl. 45-y Mezhdunar. molodezh. nauch. konf.
[Gagarin readings – 2019: Collection of abstracts of the 45th International youth. scientific conf.]. Moscow, MAI Publ., 2019, p. 150.

- [42] Altunin V.A., Davlatov N.B., Zaripova M.A., Platonov E.N., Yanovskaya M.L. *Voenmekh. Vestnik BGTU (BSTU "Voenmeh" Bulletin)*, 2019, no. 55, pp. 424–429.

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