

Энергетика и электротехника

УДК 621.45.034

К вопросу о повышении эффективности рабочего процесса в камере сгорания испарительного типа газотурбинной установки при эксплуатации на топливе с противотурбулентной присадкой*

Л.С. Яновский^{1,2}, К.Ю. Арефьев¹, И.М. Попов¹, М.А. Абрамов¹,
И.Н. Боровик¹, В.М. Ежов¹, Н.А. Червонная¹, М.А. Ильина¹

¹ Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии РАН

² Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук

On the issue of increasing the efficiency of the workflow in the combustion chamber of the evaporative type of aviation gas turbine engines when operating on fuel with an anti-turbulent additive

L.S. Yanovskiy^{1,2}, K.Yu. Arefyev¹, I.M. Popov¹, M.A. Abramov¹,
I.N. Borovik¹, V.M. Ezhov¹, N.A. Chervonnaya¹, M.A. Ilina¹

¹ Federal Research Center of Problem Chemical Physics and Medicine Chemistry Russia Academy of Science

² Federal State Budgetary Institution of Science S.S. Kutateladze Institute of Thermophysics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences

■ Исследовано влияние противотурбулентной присадки — полиизобутилена — на рабочий процесс (воспламенение и горение керосина) в камере сгорания испарительного типа газотурбинной установки. Приведены экспериментальные значения периода индукции воспламенения керосина с добавкой полиизобутилена до 1 % масс., полученные в ударной трубе. Воспламенение осуществлялось в диапазоне температуры до 1600 К при давлении до 0,25 МПа. Получены расчетные данные по влиянию периода индукции воспламенения на коэффициент полноты сгорания керосина ТС-1 с полиизобутиленом в камере сгорания испарительного типа. Выполнено сопоставление расчетных и экспериментальных значений коэффициента полноты сгорания в камере сгорания испарительного типа в диапазоне коэффициента избытка воздуха 3...7. Результаты исследования предназначены для использования при проектировании камер сгорания испарительного типа газотурбинных установок.

* Исследования проведены при финансировании Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (соглашение от 24.04.2024 № 075-15-2024-543).

EDN: AHBUSW, <https://elibrary/ahbusw>

Ключевые слова: газотурбинная установка, керосин ТС-1, полиизобутилен, период индукции воспламенения, коэффициент полноты сгорания, камера сгорания газотурбинной установки

The work is devoted to the analysis of the effect of an anti-turbulent additive, polyisobutylene, on the working process (ignition and combustion of kerosene) in the combustion chamber of an evaporative type of an aviation gas turbine engine. Gorenje is a member of the Russian Academy of Sciences. Experimental values of the ignition induction period of kerosene with the addition of polyisobutylene up to 1% by weight, obtained in an impact tube, are presented. Ignition was carried out in the temperature range up to 1600 K at pressures up to 0.25 MPa. Calculated data on the effect of the ignition induction period on the coefficient of completeness of combustion of TC-1 kerosene with polyisobutylene in an evaporative type combustion chamber of an aviation gas turbine engine are presented. A comparison of the calculated and experimental values of the coefficient of completeness of combustion in evaporative-type combustion chamber in the range of values of the coefficient of excess air from 3 to 7. The results obtained are intended for use in the design of evaporative-type combustion chamber of aviation gas turbine engines.

EDN: AHBUSW, <https://elibrary/ahbusw>

Keywords: aircraft engine, kerosene TC-1, polyisobutylene, ignition induction period, combustion coefficient, combustion chamber of an aircraft engine

Использование добавки полимеров в жидкостях для снижения гидравлического сопротивления при их течении в трубопроводах известно давно [1]. В качестве присадок к наиболее массовому виду топлива — керосину — могут выступать полимерные органические соединения, среди которых гомо- и сополимеры на основе олефинов (пропилена, изобутилена, этилена и др.), а также акрилаты и метакрилаты представляют наибольший интерес [2–4].

Варьирование степени полимеризации таких соединений дает возможность получить большое число полифункциональных присадок с заранее заданными физико-химическими свойствами, что позволяет адаптировать показатели свойств смеси керосина с присадками для достижения требуемых эксплуатационных характеристик газотурбинной установки (ГТУ). Наиболее приемлемым по технико-экономическим показателям является полиизобутилен (ПИБ).

В зависимости от структуры и протяженности молекул ПИБ можно классифицировать по молярной массе μ , определяющей степень полимеризации, следующим образом: высокомолекулярные ($\mu \geq 70\,000$ г/моль), средномолекулярные ($\mu = 17\,000 \dots 70\,000$ г/моль) и низкомолекулярные ($\mu < 17\,000$ г/моль). Количественные значения μ приведены по Штаудингеру, плотность варьируется в диапазоне $880 \dots 920$ кг/м³. Температура стеклования

для ПИБ составляет около минус 68 °С, температура вспышки — около 160 °С. В воде, спиртах, сложных эфирах и кетонах ПИБ растворяется плохо, а в некоторых углеводородах, жирах и маслах — через набухание [5].

Высокомолекулярный ПИБ в качестве присадки к керосину чаще всего применяют в виде раствора. Раствор позволяет оптимизировать реологические свойства топлива, погашать турбулентные пульсации потока в топливной системе, предотвращать загрязнение топливоподающих коллекторов и форсунок, снижать отложения кокса и уменьшать химическую эрозию стенок каналов топливной системы ГТУ.

Применение керосина с присадкой ПИБ снижает потери давления в магистрали подачи топлива на 20...24 % и повышает коэффициент полезного действия насосов на 13...17 % [6–8].

Известно, что полимерные присадки влияют на процесс капельного распада жидкости, увеличивая средний диаметр капель и меняя их распределение по диаметру [9, 10]. Это свойство используют для уменьшения риска воспламенения топливного тумана, образующегося вследствие разрушения баков при техногенных катастрофах. Очевидно, что добавление ПИБ к керосину может снизить полноту сгорания топлива из-за увеличения среднего диаметра капель.

В то же время изменение среднего диаметра капли не является единственным фактором, влияющим на полноту сгорания топлива в ка-

мере сгорания (КС) ГТУ. В некоторых случаях даже при увеличении среднего диаметра полнота сгорания не снижается, а повышается, так как важен не только средний диаметр, но и вид распределения капель по диаметру [11, 12].

Добавление раствора ПИБ в керосин может влиять на процессы его воспламенения и горения. В частности [13], возрастает период индукции воспламенения и падает коэффициент полноты сгорания смеси с воздухом при прочих равных условиях. Отклонения в этих показателях могут привести к ухудшению экономических и эмиссионных характеристик ГТУ. Нивелирование этих проблем можно обеспечить корректировкой конструкции КС, режимов ее работы и адаптацией системы управления подачей топлива.

Оценка степени влияния присадки ПИБ к керосину на процесс горения при огневых испытаниях КС затруднена вследствие разрушения структуры ПИБ при прокачке насосным агрегатом. Поэтому в форсунку попадает керосин с частично разрушенной структурой молекулы ПИБ.

Отметим, что проведенные ранее эксперименты по использованию керосина с ПИБ в современных жидкостных ракетных двигателях не выявили влияния присадок на рабочий процесс в КС [14].

Вместе с тем следует отметить отсутствие данных по влиянию ПИБ на характеристики рабочего процесса в КС ГТУ в условиях, когда полимер не разрушен полностью и попадает в форсунку в виде, который позволит проявить физические явления, связанные с эффектом Томса.

Сохранение целостности структуры полимера ПИБ возможно при использовании в качестве присадки полимеров с очень большими молекулами. В насосе и тракте охлаждения эти молекулы подвергаются деструкции, в результате чего образуются крупные фрагменты, сравнимые с размером исходной молекулы ПИБ [15, 16]. Полимерная присадка может оказать существенное влияние на параметры рабочего процесса в КС.

Проведенные исследования [14, 17] по горению керосина в среде газообразного кислорода не дали полного ответа на вопрос о влиянии присадки ПИБ на полноту сгорания керосина.

Цель работы — исследование влияния присадки на основе высокомолекулярного ПИБ в керосине ТС-1 на динамику воспламенения и полноту сгорания в КС испарительного типа ГТУ.

Основными задачами работы являлись:

- определение периода индукции воспламенения (ПИБ) $\tau_{\text{инд}}$ для смесей ТС-1 с ПИБ (при содержании ПИБ до 1 % масс.) с воздухом в диапазоне температуры до 1600 К при давлении до 0,25 МПа;
- изучение закономерностей влияния ПИБ на полноту сгорания смеси ТС-1 с ПИБ в КС испарительного типа ГТУ.

Экспериментальное исследование воспламенения топливовоздушной смеси. Основным показателем реакционной способности топливовоздушной смеси является ПИБ $\tau_{\text{инд}}$. Для определения ПИБ смеси ТС-1 с ПИБ использована экспериментальная установка на основе ударной трубы [18, 19].

Экспериментальная установка (рис. 1) состоит из камеры высокого давления (КВД) 4 и канала низкого давления (КНД) 3. Для подготовки смеси применен смеситель 6, соединенный с системой дозирования компонентов 8. Вакуумирование осуществлялось с помощью соответствующего насоса 7. В состав экспериментальной установки входили системы регистрации 2 и записи 1 сигналов от датчиков давления и оптического датчика. В баллоне 5 размещен толкающий газ (воздух, гелий). Экспериментальная установка снабжена необходимой вспомогательной технологической запорно-регулирующей и измерительно-диагностической аппаратурой.

Внутренние диаметры КНД и КВД составляли 76 мм. Длина КВД — 1,5 м, а КНД — 4,5 м. КВД и КНД разделены между собой металлической диафрагмой. Вблизи торцевой части КНД

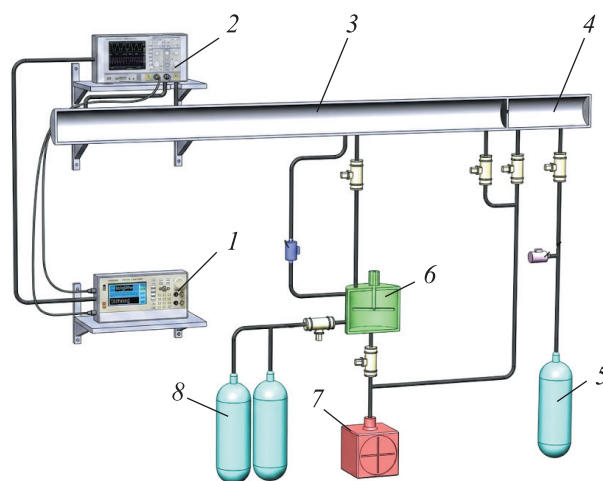


Рис. 1. Схема экспериментальной установки ударной трубы

установлены пьезоэлектрические датчики давления и оптическая система с электрическим фотоумножителем.

Принцип работы ударной трубы заключается в следующем. Сначала проводится вакуумирование смесителя, после чего в него набирается необходимое количество паров топлива и осушенного воздуха.

В случае недостаточного давления насыщенных паров топлива происходит подогрев ударной трубы. Контур подогрева обеспечивает повышение температуры реагирующих компонентов и узлов установки с целью предотвращения образования конденсата.

Смесь испаренных горючих компонентов с воздухом гомогенизируется в объеме смесителя механическим способом. Таким образом, создается топливовоздушная смесь с заданным соотношением компонентов. Количество напускае-

мых горячих газов и, соответственно, состав смеси контролируются высокоточными датчиками давления.

Основные аспекты методики обработки экспериментальных данных изложены в статье [18].

В настоящей работе определены $\tau_{\text{инд}}$ топливовоздушной смеси ТС-1 с массовой долей ПИБ $g_{\text{ПИБ}} \leq 1\%$ масс. Реализованы режимы с температурой смеси за падающей ударной волной до 1600 К при давлении до 0,25 МПа, характерном для ГТУ. Исследованы смеси с коэффициентом избытка воздуха $\alpha = 0,5 \dots 2,0$.

Результаты экспериментального определения ПИБ $\tau_{\text{инд}}$ приведены в таблице, где p и T — давление и температура смеси за падающей ударной волной.

По результатам анализа данных определены значения периодов индукции воспламенения

Экспериментальные значения ПИБ

α	p , МПа	T , К	$\tau_{\text{инд}}$, мкс	p , МПа	T , К	$\tau_{\text{инд}}$, мкс	p , МПа	T , К	$\tau_{\text{инд}}$, мкс
	$g_{\text{ПИБ}} = 0,0\%$			$g_{\text{ПИБ}} = 0,7\%$			$g_{\text{ПИБ}} = 1,0\%$		
0,5	0,11	1503	115	0,14	1321	526	0,14	1282	804
	0,11	1468	112	0,13	1352	386	0,09	1558	230
	0,16	1189	893	0,14	1288	677	0,09	1589	192
	0,09	1588	90	0,12	1423	297	0,10	1482	297
	0,13	1345	296	0,16	1194	1667	0,10	1481	303
	0,11	1466	162	0,08	1599	142	0,10	1424	376
	0,16	1210	782	0,14	1306	524	0,13	1362	503
	0,14	1311	306	0,10	1510	223	0,17	1114	6704
1,0	0,20	1123	2446	0,18	1180	1575	0,11	1573	72
	0,10	1584	43	0,14	1418	168	0,19	1130	4623
	0,13	1432	87	0,14	1383	218	0,16	1288	569
	0,13	1445	94	0,14	1415	173	0,19	1145	3578
	0,15	1347	169	0,16	1322	385	0,15	1358	316
	0,17	1254	516	0,17	1238	877	0,12	1485	126
	0,14	1384	120	0,11	1549	83	0,17	1242	994
	0,12	1479	58	0,11	1574	66	0,13	1437	193
2,0	0,13	1560	30	0,17	1347	268	0,16	1409	188
	0,18	1281	351	0,18	1196	1360	0,18	1244	952
	0,20	1189	796	0,12	1587	31	0,12	1541	70
	0,23	1107	3660	0,16	1422	130	0,18	1316	437
	0,14	1516	35	0,21	1135	3615	0,16	1390	212
	0,22	1138	2209	0,14	1494	83	0,21	1200	1338
	0,22	1163	1487	0,17	1284	470	0,20	1182	1784
	0,19	1233	505	0,13	1543	47	0,17	1328	352

ТС-1 с ПИБ $\tau_{\text{индПИБ}}$ и ТС-1 без присадки $\tau_{\text{индТС-1}}$, по которым рассчитано относительное изменение периода индукции воспламенения

$$\omega = \tau_{\text{индПИБ}} / \tau_{\text{индТС-1}}.$$

С помощью полученных значений параметра ω построены его зависимости от массовой доли ПИБ $g_{\text{ПИБ}}$ при коэффициенте избытка воздуха $\alpha = 0,5$; 1,0 и 2,0, приведенные на рис. 2. Здесь линии — результат аппроксимации экспериментальных данных.

Анализ результатов эксперимента показал, что значения параметра ω преимущественно зависят от величин $g_{\text{ПИБ}}$ и α . При этом наблюдается возможность линейной аппроксимации ω в зависимости от $g_{\text{ПИБ}}$. Угол наклона линейных зависимостей определяется производной $\partial\omega / \partial g_{\text{ПИБ}}$. Согласно полученным данным, при $g_{\text{ПИБ}} = 1\%$ масс. параметр $\omega = 1,68 \dots 2,11$. С ростом коэффициента избытка воздуха α параметр ω снижается.

Для топлива ТС-1 установлена эмпирическая зависимость

$$\partial\omega / \partial g_{\text{ПИБ}} = 183,7 - 30,19 \ln \alpha.$$

При этом погрешность относительно экспериментов составляет не более 12 %.

Увеличение параметра $\tau_{\text{инд}}$ может быть обусловлено более высокой температурой воспламенения ПИБ (~ 550 К) относительно таковой у керосина (~ 490 К). Для самовоспламенения должна произойти термодеструкция высокомолекулярного ПИБ до олигомеров или одиночных молекул. Поэтому молекулы ПИБ на ранней стадии воспламенения поглощают тепловую энергию, и процесс воспламенения керосина затягивается во времени. Это продолжается до того момента, пока молекулы ПИБ

не вступят в интенсивные химические реакции с молекулами воздуха.

Отмечено незначительное влияние температуры смеси T за ударной волной на параметр ω . Для рассмотренного диапазона $T \approx 1100 \dots 1600$ К относительное среднеквадратичное отклонение параметра ω от среднего значения (при равных $g_{\text{ПИБ}}$ и α) составляет не более 8 %. Изменение параметра ω при различных температурах носит стохастический характер, из чего можно сделать вывод, что явная температурная зависимость отсутствует.

Учитывая то, что воспламенение исследовано в узком диапазоне давления (0,09... 0,25 МПа), при определении величины ω его влияние не учитывалось.

В совокупности полученные данные свидетельствуют о значительном влиянии высокомолекулярного ПИБ на воспламенение керосина. Согласно работе [20], при таком росте периода индукции воспламенения может наблюдаться снижение коэффициента полноты сгорания. Это сопровождается увеличением количества нагара и сужением диапазона стабильного горения.

Экспериментальное исследование рабочего процесса в КС испарительного типа. Оценка влияния ПИБ на коэффициент полноты сгорания, образование нагара и срыв пламени выполнены на КС испарительного типа, конструктивная схема которой показана на рис. 3.

Экспериментальное исследование заключалось в сжигании испытуемого топлива в КС с последующим определением количества образовавшегося нагара, полноты сгорания топлива и характеристики срыва пламени. Горение топлива реализовано в жаровой трубе КС диаметром 100 мм и длиной 400 мм. Топливо в жаровую трубу КС подавалось из калиброванных струйных топливных форсунок 10 через испарительные трубки 6. Также в испарительные трубки поступала часть подаваемого воздуха. Богатая испаренная топливовоздушная смесь направлялась из загнутых концов испарительных трубок навстречу потоку воздуха, который проходил в жаровую трубу 5 через воздушные форсунки 8, расположенные во фронтовом устройстве 9. Иницирование рабочего процесса осуществлялось посредством свечи зажигания 3 и вспомогательной форсунки 10, куда подавался пусковой газообразный пропан.

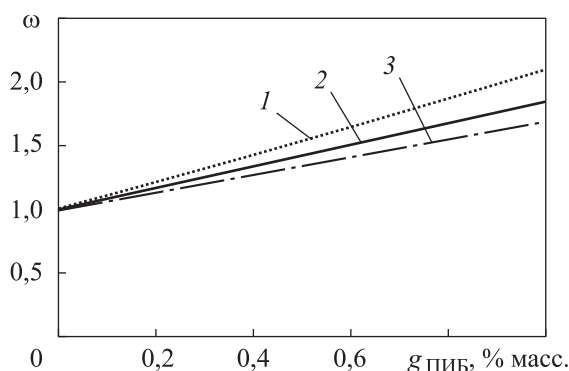


Рис. 2. Зависимости параметра ω от массовой доли ПИБ $g_{\text{ПИБ}}$ при коэффициенте избытка воздуха $\alpha = 0,5$ (1), 1,0 (2) и 2,0 (3)

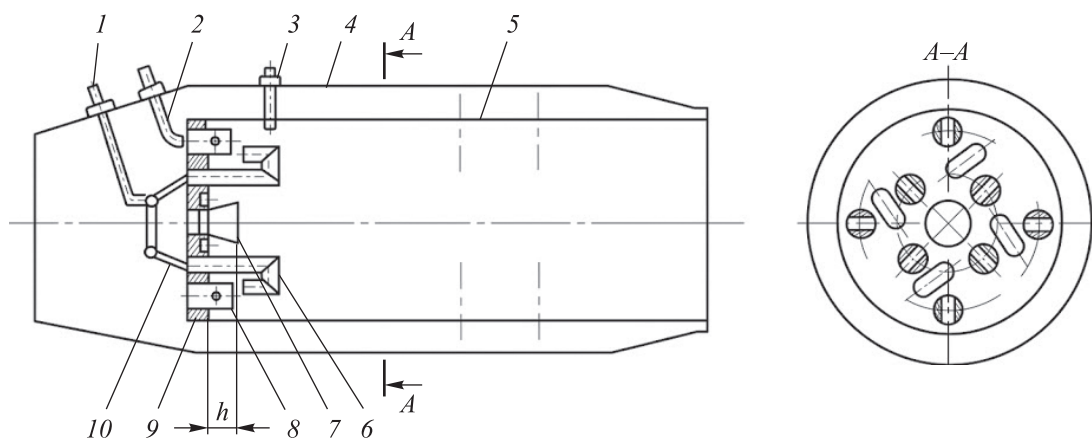


Рис. 3. Схема КС испарительного типа ГТУ:

1 — топливный коллектор; 2 — вспомогательная форсунка; 3 — свеча зажигания; 4 — корпус;
5 — жаровая труба; 6 — испарительные трубки; 7 — съемный элемент;
8 и 10 — воздушные и топливные форсунки; 9 — фронтное устройство

Особенностью КС испарительного типа является инжекция предварительно нагретого и испаренного топлива. Это позволяет организовать процесс смесеобразования и испарения для углеводородов с высокими вязкостью и поверхностным натяжением, сократить задержку воспламенения в КС и повысить полноту сгорания топлива.

В экспериментах определяли массовые расходы и давления компонентов на входе в КС. Относительная погрешность нахождения массового расхода составляла $\pm 1,31\%$ для топлива и $\pm 4,09\%$ для воздуха. Для определения температурного поля в выходном сечении КС располагали двенадцать термопар типа ТХА.

Коэффициент полноты сгорания в экспериментах определяли из теплового баланса по формуле

$$\eta = \frac{c_{pT} T_T (\alpha L_0 + 1) - c_{pB} T_B \alpha L_0}{H_u},$$

где c_{pT} и c_{pB} — средняя массовая теплоемкость продуктов сгорания и воздуха; T_T — средняя температура продуктов сгорания в выходном сечении КС; L_0 — стехиометрический коэффициент топлива; T_B — температура воздуха на входе в КС; H_u — низшая теплота сгорания топлива.

Косвенным показателем эффективности горения топлива в КС является интенсивность осаждения сажи (нагара) на стенках жаровой трубы. Для сравнительной оценки нагара в КС предусмотрен съемный элемент 7 (см. рис. 3). Количественно нагар определяли по разнице массы Δm_n съемного элемента до и после испытания.

Стабильность рабочего процесса в КС зависит от предельного значения коэффициента избытка воздуха, при котором происходит срыв пламени. В экспериментах это достигалось постепенным увеличением расхода воздуха и регистрацией параметров, когда наблюдалось погасание (срыв) пламени.

Влияние ПИБ на рабочий процесс в КС испарительного типа. Для оценки влияния ПИБ на коэффициент полноты сгорания топлива выполнены расчетные и экспериментальные исследования.

При проведении расчетов использовано соотношение

$$\eta_{\text{ПИБ}} = \eta_{0\omega} r(\omega),$$

где $\eta_{\text{ПИБ}}$ — расчетное значение коэффициента полноты сгорания ТС-1 с ПИБ; $\eta_{0\omega}$ — экспериментально зафиксированный коэффициент полноты сгорания ТС-1 без ПИБ; $r(\omega)$ — коэффициент, определяющий влияние ПИБ на изменение периода индукции воспламенения.

В предложенном соотношении для определения $\eta_{\text{ПИБ}}$ учтено влияние ПИБ на изменение периода индукции воспламенения. Принято, что фазовый переход смеси ТС-1 с ПИБ в испарительных каналах завершен, режим и структура течения внутри жаровой трубы сохранены. С учетом указанных допущений значение $r(\omega)$ можно рассчитать по методике, приведенной в работе [18].

Согласно этой методике, расчетное значение коэффициента полноты сгорания ТС-1 с ПИБ $\eta_{\text{ПИБ}}$ находят на основе обобщения зависимости

стей [21, 22] с учетом периода индукции воспламенения $\tau_{\text{инд}}$:

$$\eta_{\text{ПИБ}} = 1 - ae^{k(b\bar{Z}+1)};$$

$$a = \frac{1 - \Omega(1 - e^k)}{e^k};$$

$$b = \frac{\Psi}{a}.$$

Здесь a и b — коэффициенты, учитывающие влияние периода индукции воспламенения $\tau_{\text{инд}}$ на $\eta_{\text{ПИБ}}$; k — коэффициент, учитывающий влияние рециркуляционной зоны на начальное значение полноты сгорания η_0 [22]; $\bar{Z}$ — эквивалентная длина канала [21]; Ω и Ψ — параметры, интерполируемые кусочно-заданными функциями,

$$\Omega = \begin{cases} 1, \tau_{\text{рц}} \geq \tau_{\text{инд}}; \\ 1 - 0,06 \ln \frac{\tau_{\text{инд}}}{\tau_{\text{рц}}}, \tau_{\text{рц}} < \tau_{\text{инд}}; \end{cases}$$

$$\Psi = \begin{cases} 1, \tau_{\text{инд}} > 5 \cdot 10^{-5}; \\ 1 - 0,067 \ln 20000 \tau_{\text{инд}}, 5 \cdot 10^{-5} < \tau_{\text{инд}} < 10^{-3}; \\ 0,8 - 0,2 \ln 1000 \tau_{\text{инд}}, \tau_{\text{инд}} > 10^{-3}, \end{cases}$$

где $\tau_{\text{рц}}$ — время пребывания горючего в рециркуляционной зоне.

Принимая во внимание характерный размер зоны рециркуляции КС, значения $\tau_{\text{рц}}$ соответствуют диапазону $10^{-4} \dots 10^{-3}$ с.

Расчетные оценки значения $\eta_{\text{ПИБ}}$ по предложенной методике и корректировка эмпирических коэффициентов проведена с учетом полученных экспериментальных значений коэффициентов полноты сгорания $\eta_{0\alpha}$ для КС.

Значения $\eta_{0\alpha}$ определены экспериментально для КС при расходе воздуха 0,1 кг/с, атмосферном давлении и коэффициенте избытка воздуха $\alpha = 3 \dots 7$. Продолжительность каждого испытания составляла 600 с, в пределах которых проводилось осреднение измеряемых параметров. Экспериментальные значения $\eta_{0\alpha}$ варьируются от 0,86 при $\alpha = 3$ до 0,99 при $\alpha = 7$, что удовлетворительно согласуется с расчетами по моделям [21, 22].

При добавлении ПИБ в ТС-1 коэффициент полноты сгорания падает на 2,5...4,7 %, причем наибольшее снижение характерно для меньших значений α и максимальной массовой доли $g_{\text{ПИБ}}$. Валидационные эксперименты показывают, что при сопоставлении расчетных и экспериментальных значений коэффициента полноты сгорания для топлива ТС-1 с присадкой

ПИБ различия $\eta_{\text{ПИБ}}$ составляют не более 1,4 %, а характер зависимостей — одинаковый. Расчетно-экспериментальная зависимость параметра $\eta_{\text{ПИБ}}$ от коэффициента избытка воздуха α и массовой доли ПИБ $g_{\text{ПИБ}}$ для КС испарительного типа приведена на рис. 4.

Для оценки количества нагара в КС выполнены дополнительные эксперименты при расходе воздуха 0,05 кг/с, коэффициенте избытка воздуха $\alpha = 4$ и продолжительности испытания 1 ч.

Установлено, что с повышением содержания ПИБ в топливе масса нагара m_n на съемном элементе КС увеличивается, причем эта зависимость близка к линейной. Характерным показателем является относительная производная

$$\frac{1}{m_n} \frac{\partial m_n}{\partial g_{\text{ПИБ}}} = 220.$$

Относительная масса нагара на съемном элементе, приведенная к суммарной массе сгоревшего исходного ТС-1, составляет $5,7 \cdot 10^{-6}$, а при добавлении в топливо 1 % масс. ПИБ она увеличивается примерно до $1,2 \cdot 10^{-5}$.

Полученные данные указывают на то, что относительно небольшие доли присадки ПИБ приводят к значительному образованию сажи и появлению нагара. Особенно значимым это становится вблизи фронтального устройства. Причиной является возрастание периода индукции воспламенения и протяженности фронта пламени, и соответственно, снижение коэффициента полноты сгорания, которое сопро-

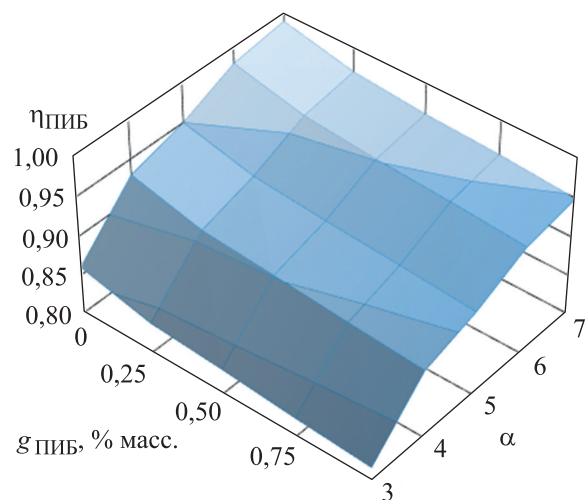


Рис. 4. Расчетно-экспериментальная зависимость параметра $\eta_{\text{ПИБ}}$ от коэффициента избытка воздуха α и массовой доли ПИБ $g_{\text{ПИБ}}$ для КС испарительного типа

вождается образованием сажи и ее осаждением на элементах конструкции КС. В результате увеличивается эмиссия несгоревших углеводородов и снижается энергетическая эффективность рабочего процесса в КС [11].

Следует отметить, что значительной разницы в коэффициенте избытка воздуха, соответствующего срыву пламени, при горении топлива ТС-1 с присадкой ПИБ и без нее в экспериментах не обнаружено. Срыв пламени во всех экспериментах наблюдался в диапазоне коэффициента избытка воздуха $\alpha = 8 \dots 9$.

Приведенные результаты предназначены для проектирования КС испарительного типа ГТУ.

Вывод

По результатам расчетно-экспериментального исследования влияния высокомолекулярного ПИБ на рабочий процесс (воспламенение и горение керосина ТС-1) в КС испарительного типа ГТУ, установлено следующее:

- с увеличением содержания ПИБ в топливе ТС-1 период индукции воспламенения керосина повышается; при добавлении 1 % масс. ПИБ

период индукции воспламенения керосина повышается в 1,68–2,11 раза в диапазоне коэффициентов избытка воздуха $\alpha = 0,5 \dots 2,0$; с ростом коэффициента избытка воздуха влияние присадки ПИБ на период индукции воспламенения топлива снижается;

- при добавлении ПИБ в топливо ТС-1 в количестве 1 % масс. коэффициент полноты сгорания для КС испарительного типа падает на 2,5...4,7 %; наибольшее снижение характерно для меньших значений α и максимальной массовой доли ПИБ;

- относительная масса нагара на съемном элементе КС, приведенная к суммарной массе сгоревшего ТС-1 (без добавления ПИБ), составляет $5,7 \cdot 10^{-6}$; при добавлении 1 % масс. ПИБ в топливо относительная масса нагара возрастает примерно до $1,2 \cdot 10^{-5}$, что указывает на увеличение эмиссии сажи и дымности выхлопа, а также на снижение эффективности рабочего процесса в КС;

- значительного изменения коэффициента избытка воздуха, соответствующего срыву пламени ТС-1 при добавлении ПИБ, не зафиксировано; срыв пламени наблюдался в диапазоне коэффициента избытка воздуха $\alpha = 8 \dots 9$.

Литература

- [1] Toms B.A. Some observations on the flow of linear polymer solutions through straight tubes at large Reynolds numbers. *Proc. 1st Int. Congress on Rheology*, 1949, vol. 2, pp. 135–141.
- [2] Данилов А.М. *Применение присадок в топливах*. Москва, Мир, 2005. 286 с.
- [3] Манжай В.Н., Илюшников А.В., Гареев М.М. и др. Лабораторные исследования и промышленные испытания полимерной добавки для снижения энергетических затрат на магистральном нефтепроводе. *Инженерно-физический журнал*, 1993, т. 65, № 5, с. 515–517.
- [4] Яновский Л.С., Дубовкин Н.Ф., Галимов Ф.М. и др. *Горюче-смазочные материалы для авиационных двигателей*. Казань, Мастер Лайн, 2002. 399 с.
- [5] Кулиев А.М. *Химия и технология присадок к маслам и топливам*. Ленинград, Химия, 1985. 312 с.
- [6] Chvanov V.K., Fatuev I.Y., Levochkin P.S. et al. Expand of capabilities of rocket and space complexes with high molecular additives to liquid propellant components. *Proc. IAC*, 2013, pp. 6879–6886.
- [7] Гапонов В.Д., Фатуев И.Ю. Анализ эффективности использования полимерной присадки в горючем маршевых двигателей РН «Зенит». *Труды НПО Энергомаш им. академика В.П. Глушко*, 2005, № 23, с. 15–26.
- [8] Гапонов В.Д. Оценка улучшения технических и энергомассовых характеристик маршевых двигателей РН «Союз» при введении в горючее присадки высокомолекулярного полиизобутилена. *Конверсия в машиностроении*, 2008, № 3, с. 68–72.
- [9] Smolinski J.M., Gulari E., Manke C.W. Atomization of dilute polyisobutylene/mineral oil solutions. *AIChE J.*, 1996, vol. 42, no. 5, pp. 1201–1212, doi: <https://doi.org/10.1002/aic.690420502>
- [10] Rozhkov A.N. Dynamics and breakup of viscoelastic liquids (a review). *Fluid Dyn.*, 2005, vol. 40, no. 6, pp. 835–853, doi: <https://doi.org/10.1007/s10697-006-0001-7>

- [11] Lefebvre A.H. *Gas turbine combustion*. Hemisphere, 1983. 550 p.
- [12] Боровик И.Н., Строкач Е.А. Влияние дисперсности распыла капель форсунками на полноту сгорания топлива в жидкостном ракетном двигателе. *Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника*, 2016, № 44, с. 45–62, doi: <https://doi.org/10.15593/2224-9982/2016.44.03>
- [13] Borovik I., Strokach E., Kozlov A. et al. Influence of polyisobutylene kerosene additive on combustion efficiency in a liquid propellant rocket engine. *Aerospace*, 2019, vol. 6, no. 12, art. 129, doi: <https://doi.org/10.3390/aerospace6120129>
- [14] Гапонов В.Д., Медведев В.К., Семенов С.Н. Влияние добавки ПИБ к керосину на внутрикамерные процессы ЖРД. *Труды НПО Энергомаш им. академика В.П. Глушко*, 2016, № 33, с. 60–80.
- [15] Wei M.H., Li B., Ameri David R.L. et al. Megasupramolecules for safer, cleaner fuel by end association of long telechelic polymers. *Science*, 2015, vol. 350, no. 6256, pp. 72–75, doi: <https://doi.org/10.1126/science.aab0642>
- [16] Гапонов В.Д., Коновалов К.Б. Сравнение эффективности снижения гидродинамического трения жидких углеводородов добавками полиизобутилена и сополимера высших альфа-олефинов. *Труды НПО Энергомаш им. академика В.П. Глушко*, 2013, № 30, с. 33–47.
- [17] Gaponov V.D., Chvanov V.K., Fatuev I.Y. et al. The investigation of influence polyisobutylene additions to kerosene at the efficiency of combustion. In: *Heat analysis and thermodynamic effects*. IntechOpen, 2011, pp. 295–312, doi: <https://doi.org/10.5772/22819>
- [18] Яновский Л.С., Варакин А.Ю., Арефьев К.Ю. и др. Исследование воспламенения и горения синтетических высокомолекулярных углеводородов в высокоэнтальпийном воздушном потоке. *Физика горения и взрыва*, 2023, т. 59, № 4, с. 35–43, doi: <https://doi.org/10.15372/FGV2022.9220>
- [19] Азатян В.В. Особенности физико-химических механизмов и кинетических закономерностей горения, взрыва и детонации газов. *Кинетика и катализ*, 2020, т. 61, № 3, с. 291–311, doi: <https://doi.org/10.31857/S0453881120030041>
- [20] Зельдович Я.Б., Баренблатт Г.Н., Либрович В.Б. и др. *Математическая теория горения и взрыва*. Москва, Наука, 1980. 478 с.
- [21] Аннушкин Ю.М. Основные закономерности выгорания турбулентных струй водорода в воздушных каналах. *Физика горения и взрыва*, 1981, т. 17, № 4, с. 59–71.
- [22] Александров В.Ю., Кукшинов Н.В. Модифицированная кривая выгорания для модельных высокоскоростных камер сгорания, интегрированных с воздухозаборным устройством. *Физика горения и взрыва*, 2016, т. 52, № 3, с. 32–36, doi: <https://doi.org/10.15372/FGV20160304>

References

- [1] Toms B.A. Some observations on the flow of linear polymer solutions through straight tubes at large Reynolds numbers. *Proc. 1st Int. Congress on Rheology*, 1949, vol. 2, pp. 135–141.
- [2] Danilov A.M. *Primenenie prisadok v toplivakh* [Use of additives in fuels]. Moscow, Mir Publ., 2005. 286 p. (In Russ.).
- [3] Manzhay V.N., Ilyushnikov A.V., Gareev M.M. et al. Laboratory studies and commercial tests of a polymeric agent for reduction of the power consumption on an oil pipeline. *Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal*, 1993, vol. 65, no. 5, pp. 515–517. (In Russ.). (Eng. version: *J. Eng. Phys. Thermophys.*, 1993, vol. 65, no. 5, pp. 1041–1043, doi: <https://doi.org/10.1007/BF00862028>)
- [4] Yanovskiy L.S., Dubovkin N.F., Galimov F.M. et al. *Goryuche-smazochnye materialy dlya aviatsionnykh dvigateley* [Fuels and lubricants for aircraft engines]. Kazan, Master Layn Publ., 2002. 399 p. (In Russ.).
- [5] Kuliev A.M. *Khimiya i tekhnologiya prisadok k maslam i toplivam* [Chemistry and technology of oil and fuel additives]. Leningrad, Khimiya Publ., 1985. 312 p. (In Russ.).
- [6] Chvanov V.K., Fatuev I.Y., Levochkin P.S. et al. Expand of capabilities of rocket and space complexes with high molecular additives to liquid propellant components. *Proc. IAC*, 2013, pp. 6879–6886.

- [7] Gaponov V.D., Fatuev I.Yu. Analysis of effectiveness when using the polymer additive in the fuel of the cruising engines on the "Zenit" launch vehicles. *Trudy NPO Energomash im. akademika V.P. Glushko*, 2005, no. 23, pp. 15–26. (In Russ.).
- [8] Gaponov V.D. Evaluation of the improvement of technical and energy-mass characteristics of the Soyuz launch vehicle's main engines when a high-molecular-weight polyisobutylene additive is added to the fuel. *Conversion in Mechanical Engineering*, 2008, no. 3, pp. 68–72.
- [9] Smolinski J.M., Gulari E., Manke C.W. Atomization of dilute polyisobutylene/mineral oil solutions. *AIChE J.*, 1996, vol. 42, no. 5, pp. 1201–1212, doi: <https://doi.org/10.1002/aic.690420502>
- [10] Rozhkov A.N. Dynamics and breakup of viscoelastic liquids (a review). *Fluid Dyn.*, 2005, vol. 40, no. 6, pp. 835–853, doi: <https://doi.org/10.1007/s10697-006-0001-7>
- [11] Lefebvre A.H. *Gas turbine combustion*. Hemisphere, 1983. 550 p.
- [12] Borovik I.N., Strokach E.A. Spray diameter distribution influence on liquid rocket combustion chamber performance. *Vestnik PNIPU. Aerokosmicheskaya tekhnika* [PNRPU Aerospace Engineering Bulletin], 2016, no. 44, pp. 45–62, doi: <https://doi.org/10.15593/2224-9982/2016.44.03> (in Russ.).
- [13] Borovik I., Strokach E., Kozlov A. et al. Influence of polyisobutylene kerosene additive on combustion efficiency in a liquid propellant rocket engine. *Aerospace*, 2019, vol. 6, no. 12, art. 129, doi: <https://doi.org/10.3390/aerospace6120129>
- [14] Gaponov V.D., Medvedev V.K., Semenov S.N. Influence of PIB polymer additives to hydrocarbon fuel on in-chamber processes of LRE. *Trudy NPO Energomash im. akademika V.P. Glushko*, 2016, no. 33, pp. 60–80. (In Russ.).
- [15] Wei M.H., Li B., Ameri David R.L. et al. Megasupramolecules for safer, cleaner fuel by end association of long telechelic polymers. *Science*, 2015, vol. 350, no. 6256, pp. 72–75, doi: <https://doi.org/10.1126/science.aab0642>
- [16] Gaponov V.D., Konovalov K.B. Comparison of effectiveness of reduce of hydrodynamic friction of liquid hydrocarbons with additives of polyisobutylene and higher alpha-olefins copolymer. *Trudy NPO Energomash im. akademika V.P. Glushko*, 2013, no. 30, pp. 33–47. (In Russ.).
- [17] Gaponov V.D., Chvanov V.K., Fatuev I.Y. et al. The investigation of influence polyisobutylene additions to kerosene at the efficiency of combustion. In: *Heat analysis and thermodynamic effects*. IntechOpen, 2011, pp. 295–312, doi: <https://doi.org/10.5772/22819>
- [18] Yanovskiy L.S., Varaksin A.Yu., Arefyev K.Yu. et al. Ignition and combustion of synthetic high molecular weight hydrocarbons in high-enthalpy air flow. *Fizika goreniya i vzryva*, 2023, vol. 59, no. 4, pp. 35–43, doi: <https://doi.org/10.15372/FGV2022.9220> (in Russ.). (Eng. version: *Combust. Explos. Shock Waves*, 2023, vol. 59, no. 4, pp. 424–431, doi: <https://doi.org/10.1134/S0010508223040044>)
- [19] Azatyan V.V. Features of the physicochemical mechanisms and kinetic laws of combustion, explosion, and detonation of gases. *Kinetika i kataliz*, 2020, vol. 61, no. 3, pp. 291–311, doi: <https://doi.org/10.31857/S0453881120030041> (in Russ.). (Eng. version: *Kinet. Catal.*, 2020, vol. 61, no. 3, pp. 319–338, doi: <https://doi.org/10.1134/S0023158420030039>)
- [20] Zeldovich Ya.B., Barenblatt G.N., Librovich V.B. et al. *Matematicheskaya teoriya goreniya i vzryva* [Mathematical theory of combustion and explosion]. Moscow, Nauka Publ., 1980. 478 p. (In Russ.).
- [21] Annushkin Yu.M. Basic rules governing the burning of turbulent jets of hydrogen in air channels. *Fizika goreniya i vzryva*, 1981, vol. 17, no. 4, pp. 59–71. (In Russ.). (Eng. version: *Combust. Explos. Shock Waves*, 1981, vol. 17, no. 4, pp. 400–411, doi: <https://doi.org/10.1007/BF00761209>)
- [22] Aleksandrov V.Yu., Kukshinov N.V. Modified combustion efficiency curve for high-velocity model combustors integrated with the inlet. *Fizika goreniya i vzryva*, 2016, vol. 52, no. 3, pp. 32–36, doi: <https://doi.org/10.15372/FGV20160304> (in Russ.). (Eng. version: *Combust. Explos. Shock Waves*, vol. 52, no. 3, pp. 281–285, doi: <https://doi.org/10.1134/S0010508216030047>)

Информация об авторах

ЯНОВСКИЙ Леонид Самойлович — член-корреспондент РАН, доктор технических наук, профессор, заведующий отделом горения и взрыва. Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии РАН (142432, Черноголовка, Российская Федерация, пр-т академика Семенова, д. 1); Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук (630090, Новосибирск, пр. Ак. Лаврентьева, 1, e-mail: leonidyanovskiy@yandex.ru).

АРЕФЬЕВ Константин Юрьевич — доктор технических наук, инженер лаборатории горения в высокоскоростных потоках отдела горения и взрыва. Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии РАН (142432, Черноголовка, Российская Федерация, пр-т академика Семенова, д. 1, e-mail: arefyev@yandex.ru).

ПОПОВ Иван Михайлович — инженер лаборатории горения в высокоскоростных потоках отдела горения и взрыва. Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии РАН (142432, Черноголовка, Российская Федерация, пр-т академика Семенова, д. 1, e-mail: ivanus1977@mail.ru).

АБРАМОВ Максим Александрович — кандидат технических наук, инженер лаборатории горения в высокоскоростных потоках отдела горения и взрыва. Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии РАН (142432, Черноголовка, Российская Федерация, пр-т академика Семенова, д. 1, e-mail: abramovmaks94@yandex.ru).

БОРОВИК Игорь Николаевич — кандидат технических наук, инженер лаборатории горения в высокоскоростных потоках отдела горения и взрыва. Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии РАН (142432, Черноголовка, Российская Федерация, пр-т академика Семенова, д. 1, e-mail: borovikin@mai.ru).

ЕЖОВ Василий Михайлович — кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории горения в высокоскоростных потоках отдела горения и взрыва. Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии РАН (142432, Черноголовка, Российская Федерация, пр-т академика Семенова, д. 1, e-mail: anathema40000@gmail.com).

Information about the authors

YANOVSKIY Leonid Samoilovich — Corresponding Member of Russian Academy of Sciences, Doctor of Science (Eng.), Professor, Head of Laboratory of Combustion in High-speed streams at Department of Combustion and Explosion. Federal Research Center of Problem Chemical Physics and Medicine Chemistry Russia Academy of Science (142432, Chernogolovka, Russian Federation, Akademika Semenova Ave., Bldg. 1); Federal State Budgetary Institution of Science S.S. Kutateladze Institute of Thermophysics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (630090, Novosibirsk, Ak. Lavrentyev Avenue, 1, e-mail: leonidyanovskiy@yandex.ru).

AREFYEV Konstantin Yurievich — Doctor of Science (Eng.), Engineer, Laboratory of Combustion in High-speed streams at Department of Combustion and Explosion. Federal Research Center of Problem Chemical Physics and Medicine Chemistry Russia Academy of Science (142432, Chernogolovka, Russian Federation, Akademika Semenova Ave., Bldg. 1, e-mail: arefyev@yandex.ru).

POPOV Ivan Mikhailovich — Engineer, Laboratory of Combustion in High-speed streams at Department of Combustion and Explosion. Federal Research Center of Problem Chemical Physics and Medicine Chemistry Russia Academy of Science (142432, Chernogolovka, Russian Federation, Akademika Semenova Ave., Bldg. 1, e-mail: ivanus1977@mail.ru).

ABRAMOV Maxim Alexandrovich — Candidate of Science (Eng.), Engineer. Laboratory of Combustion in High-speed streams at Department of Combustion and Explosion. Federal Research Center of Problem Chemical Physics and Medicine Chemistry Russia Academy of Science (142432, Chernogolovka, Russian Federation, Akademika Semenova Ave., Bldg. 1, e-mail: abramovmaks94@yandex.ru).

BOROVIK Igor Nikolaevich — Candidate of Science (Eng.), Engineer, Laboratory of Combustion in High-speed streams at Department of Combustion and Explosion. Federal Research Center of Problem Chemical Physics and Medicine Chemistry Russia Academy of Science (142432, Chernogolovka, Russian Federation, Akademika Semenova Ave., Bldg. 1, e-mail: borovikin@mai.ru).

EZHOV Vasilii Mikhailovich — Candidate of Science (Eng.), Senior Researcher, Laboratory of Combustion in High-speed streams at Department of Combustion and Explosion. Federal Research Center of Problem Chemical Physics and Medicine Chemistry Russia Academy of Science (142432, Chernogolovka, Russian Federation, Akademika Semenova Ave., Bldg. 1, e-mail: anathema40000@gmail.com).

ЧЕРВОННАЯ Надежда Анатольевна — кандидат химических наук, старший научный сотрудник лаборатории горения в высокоскоростных потоках отдела горения и взрыва. Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии РАН (142432, Черноголовка, Российская Федерация, пр-т академика Семенова, д. 1, e-mail: nadan@icp.ac.ru).

CHERVONNAYA Nadezhda Anatolyevna — Candidate of Science (Chemistry), Senior Researcher, Laboratory of Combustion in High-speed streams at Department of Combustion and Explosion. Federal Research Center of Problem Chemical Physics and Medicine Chemistry Russia Academy of Science (142432, Chernogolovka, Russian Federation, Akademika Semenova Ave., Bldg. 1, e-mail: nadan@icp.ac.ru).

ИЛЬИНА Марина Анатольевна — младший научный сотрудник лаборатории горения в высокоскоростных потоках отдела горения и взрыва. Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии РАН (142432, Черноголовка, Российская Федерация, пр-т академика Семенова, д. 1, e-mail: mailina2025@yandex.ru).

ILINA Marina Anatolyevna — Junior Researcher, Laboratory of Combustion in High-speed streams at Department of Combustion and Explosion. Federal Research Center of Problem Chemical Physics and Medicine Chemistry Russia Academy of Science (142432, Chernogolovka, Russian Federation, Akademika Semenova Ave., Bldg. 1, e-mail: mailina2025@yandex.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Яновский Л.С., Арефьев К.Ю., Попов И.М., Абрамов М.А., Боровик И.Н., Езов В.М., Червонная Н.А., Ильина М.А. К вопросу о повышении эффективности рабочего процесса в камере сгорания испарительного типа газотурбинной установки при эксплуатации на топливе с противотурбулентной присадкой. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2026, № 4, с. 108–119.

Please cite this article in English as:

Yanovskiy L.S., Arefyev K.Yu., Popov I.M., Abramov M.A., Borovik I.N., Ezhov V.M., Chervonnaya N.A., Ilina M.A. On the issue of increasing the efficiency of the workflow in the combustion chamber of the evaporative type of aviation gas turbine engines when operating on fuel with an anti-turbulent additive. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2026, no. 4, pp. 108–119.



**Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана
предлагает читателям учебное пособие
под редакцией В.Н. Богомолова
«Основы теории и расчета
жидкостных ракетных двигателей»**

Рассмотрены вопросы испытаний ракетного оружия. Показано, что процесс испытаний является составной частью проектирования и разработки образца ракетного оружия. Приведена классификация испытаний по видам и категориям, включающая в себя наземные и летные испытания, а также научно-исследовательские испытания, испытания на этапах опытно-конструкторской работы и серийного производства. Описаны методы, технические средства и оборудование для проведения испытаний ракетного оружия. Представлены фотоматериалы различных испытаний ракетного оружия, наглядно показывающие его функционирование.

Для студентов старших курсов, обучающихся по специальности 17.05.02 «Стрелково-пушечное, артиллерийское и ракетное вооружение», изучающих курсы «Испытания ракетного оружия», «Испытания ракетного и ствольного оружия». Пособие может быть полезно студентам смежных специальностей, аспирантам и инженерам.

По вопросам приобретения обращайтесь:

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.

Тел.: +7 499 263-60-45, факс: +7 499 261-45-97;

press@bmstu.ru; <https://press.bmstu.ru>