

Энергетическое, металлургическое и химическое машиностроение

УДК 683.878.2

doi: 10.18698/0536-1044-2021-6-37-47

Разработка методики расчета температуры внутренней стенки мультитопливной форсунки с целью предотвращения осадкообразования и перегрева

К.В. Алтунин

КНИТУ им. А.Н. Туполева — КАИ

Development of a Technique for Calculating the Temperature of the Multi-Fuel Nozzle Inner Wall in order to Prevent Deposit Formation and Overheating

K.V. Altunin

Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev — KAI

Приведены результаты теоретического исследования по получению формулы для расчета температуры внутренней стенки рубашки охлаждения мультитопливной форсунки. Затронута проблема перегрева этих форсунок, а также образования углеродосодержащих осадков в жидких углеводородных горючих и охладителях. Рассмотрены различные способы борьбы с осадкообразованием, включая охлаждение стенки топливного канала до 373 К. В случае мультитопливных форсунок можно эффективно применять сразу несколько горючих, а также охладителей. Исследованы свойства некоторых теплоносителей, включая керосин ТС-1 и природный газ. На основе полученной формулы для определения температуры рубашки охлаждения мультитопливной форсунки проведен теоретический расчет внутренних температур форсунок одинаковой массы с несколькими теплоносителями. Анализ результатов теоретического исследования показал, что мультитопливные форсунки охлаждаются лучше, чем однотопливные, и позволяют прогнозировать расход топлива с целью достижения необходимой температуры стенки, предотвращения перегрева и осадкообразования.

Ключевые слова: мультитопливная форсунка, температура внутренней стенки, предотвращение осадкообразования

The article presents the results of a theoretical study on obtaining the formula for calculating the temperature of the inner wall of the multi-fuel nozzle cooling jacket. The problem of overheating these nozzles, as well as the formation of carbon-containing deposits in liquid hydrocarbon fuels and coolants, is discussed. The different ways of dealing with sediment formation, including cooling the fuel channel wall to 373 K are considered. In the case of multi-fuel nozzles, several fuels and coolers can be effectively used at once. The properties of some coolants, including TS-1 kerosene and natural gas, have been investigated. Based on

the obtained formula for determining the temperature of the multi-fuel nozzle cooling jacket, a theoretical calculation of the internal temperatures of nozzles of the same mass with several coolants was carried out. An analysis of the results of a theoretical study showed that multi-fuel nozzles are cooled better than single-fuel nozzles and allow predicting fuel consumption in order to achieve the required wall temperature, prevent overheating and sediment formation.

Keywords: multifuel nozzle, internal wall temperature, prevention of deposit formation

На сегодняшний день многие реактивные двигатели, включая газотурбинные (ГТД), все еще активно работают на жидких углеводородных горючих (УВГ) и охладителях (УВО).

Жидкие УВГ доставляются в распыленном виде в камеры сгорания ГТД с помощью форсунок. Схема расположения штатных форсунок воздушно-реактивного двигателя НК-8-2У показана на рис. 1, а конструктивная схема штатной однотопливной форсунки (ОТФ), применяемой в различных ГТД, — на рис. 2.

Дальнейшее развитие ГТД неизбежно приведет к модернизации всей топливной системы. Как следствие, форсунки также претерпят некоторые изменения. В частности, будут более многофункциональными и мультитопливными (многотопливными), с увеличенным запасом по ресурсу и надежности.

В настоящее время актуальной задачей является разработка многотопливных форсунок [1–5], которые могли бы одновременно или попеременно доставлять в камеру сгорания разные

горючие, а также эффективно охлаждаться от дополнительных теплоносителей (ТН), протекающих через них.

Конструктивная схема двухтопливной форсунки (ДТФ), где в качестве горючего выступают газ и жидкое топливо [5] (рис. 3), включает в себя корпус 1, втулку 2, распылитель 3, уплотнительное кольцо 4, шайбу 5, газораздающие отверстия 6 и 10, кожух 7, ряд отверстий 8, 9, пазы 11 в качестве распылителя и кольцевые камеры 12, 13. Такая форсунка позволяет организовать эффективную подачу газообразного и жидкого топлив в камеру сгорания двигателя.

При использовании жидких УВГ (УВО) на металлических стенках топливоподающих каналов и форсунок образуются углеродосодержащие осадки. Например, широко известны такие проблемы эксплуатации ГТД, как частичное или полное закоксовывание топливных форсунок и преждевременный выход из строя фильтров и распылителей. В целом образование углеродосодержащих осадков (осад-

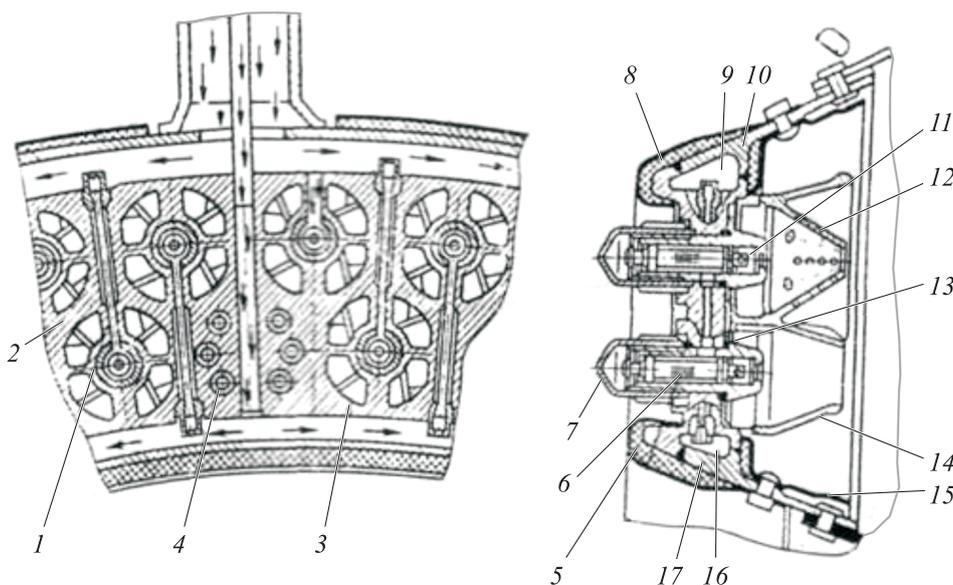


Рис. 1. Схема расположения штатных форсунок воздушно-реактивного двигателя НК-8-2У:

- 1 — экранирующая трубка; 2 — форсуночная плата; 3 — завихритель форсунки; 4 — отверстия для подвода воздуха; 5 — козырек; 6 — фильтр; 7 — шлицевая гайка; 8 — теплоизоляционный материал; 9, 16 — топливные коллекторы; 10 — кольцо; 11 — распылитель; 12 и 14 — форсунки первого и второго контуров; 13 — уплотнительное кольцо; 15 — отражатель; 17 — кольцо

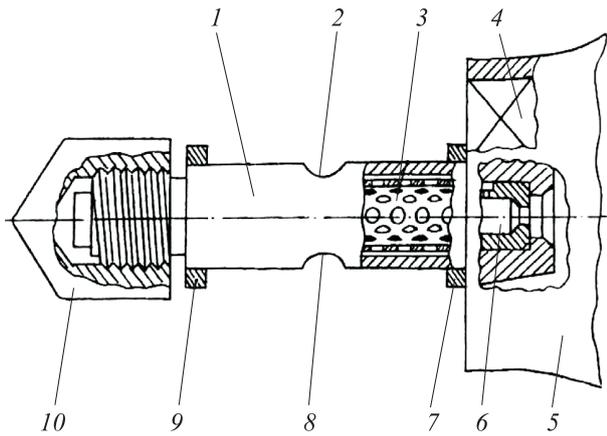


Рис. 2. Конструктивная схема штатной ОТФ воздушно-реактивного двигателя семейства НК: 1 — корпус; 2, 8 — входные отверстия; 3 — сетчатый фильтр; 4 — завихритель; 5 — отражатель; 6 — распылитель; 7, 9 — выступы для крепления; 10 — гайка

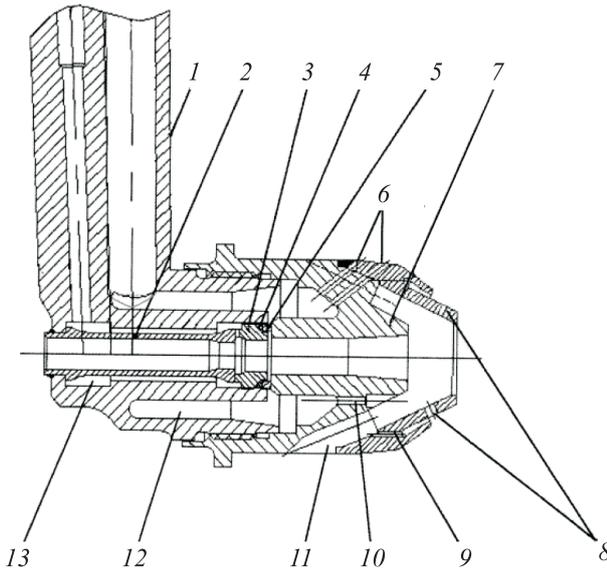


Рис. 3. Конструктивная схема ДТФ

кообразование) — опасный тепловой процесс, который может привести к потере тяги и снижению ресурса ГТД. Вследствие образования таких осадков значительно быстрее происходит забивка топливных фильтров, а также коррозия деталей топливно-охлаждающей аппаратуры [6–12].

Активное применение нескольких топлив в одной форсунке решит некоторые проблемы, включая излишний перегрев стенок, осадкообразование, невысокую эффективность и надежность, а также повысит срок службы ГТД.

Цель работы — создание методики расчета температуры внутренней стенки мультитопливной форсунки ГТД на основе новой форму-

лы, учитывающей теплофизические свойства горючих и ТН, а также массу форсунки и материала, из которого она изготовлена.

Приведена методика расчета температуры внутренней стенки мультитопливной форсунки ГТД с целью прогнозирования должного охлаждения и эффективного предотвращения образования углеродосодержащих осадков на начальной стадии эксплуатации.

Анализ процесса осадкообразования. Известно, что термин «осадкообразование» появился примерно во второй половине XX века в связи с интенсивным применением реактивных топлив и впервые встретился в работе Я.Б. Черткова [10]. Осадкообразование в жидких УВГ (УВО) является достаточно сложным и опасным тепловым процессом, борьба с которым требует больших материальных затрат [9].

Чтобы правильно и эффективно бороться с ним в форсунках, топливных каналах и других частях энергоустановок и двигателей, работающих на жидких УВГ (УВО), необходимо знать факторы, влияющие на осадкообразование. Внешний вид форсунки НК-8-2У, применяемой в ГТД самолета Ту-154, до эксплуатации и после 900 циклов работы с осадком показан на рис. 4.

Осадкообразование δ_{oc} , мкм, в топливных системах энергоустановок многоразового использования (ЭУМИ) и реактивных двигателей (РД) зависит от следующих основных факторов [6–8]:

$$\delta_{oc} = f(T_w, T_f, p, w, M, A, K_r, K_{O_2}, K_{in}, X, N, G, E, \tau), \quad (1)$$

где T_w — температура стенки, К; T_f — температура УВГ (УВО), К; p — давление в топливно-охлаждающей системе, Па; w — скорость прокачки УВГ (УВО), м/с; M — материал стенки; A — присадки; K_r — степень шероховатости

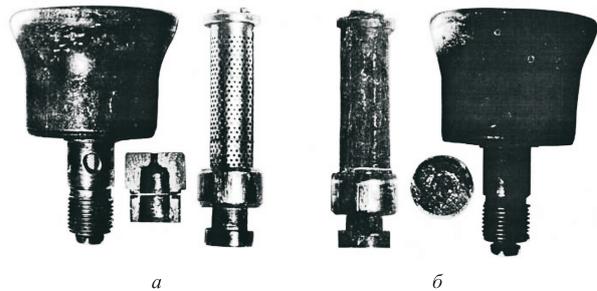


Рис. 4. Внешний вид форсунки НК-8-2У, применяемой в ГТД самолета Ту-154: а — до эксплуатации; б — после 900 циклов работы с осадком

поверхности; K_{O_2} и K_{in} — насыщенность кислородом и инертными газами, %; X — вид УВГ (УВО), его физико-химические и физико-технические характеристики и свойства; N — число циклов работы ЭУМИ, РД; G — геометрические характеристики внутренних узлов топливно-охлаждающих систем (габаритные размеры выемок (лунок), расстояния между деталями, и т. д.); E — напряженность электростатического поля, В/м; τ — время наработки, ч.

В общем можно констатировать, что из-за нагрева осадкообразование происходит в местах контакта жидкого УВГ (например, керосина) с горячими металлическими поверхностями. У штатной ОТФ (см. рис. 2) углеродосодержащие осадки могут появляться: на входных отверстиях 2 и 8, сетчатом фильтре 3 и внутри него, в пространстве между ним и корпусом (внутренней стенкой) 1 и в канале распылителя 6.

Фактором, влияющим на появление и рост углеродосодержащих осадков, является температура, что видно в формуле (1). Так, с повышением нагрева охладителей и горючих размеры частиц осадка в них увеличиваются с 30 до 120 мкм. Для каждого жидкого УВГ существует определенная температура, при которой наблюдается максимум осадков. Можно утверждать, что в среднем 100 °С — граница появления осадков в жидких УВГ (УВО) на металлических стенках [8].

Значения теплофизических свойств углеродосодержащих осадков в топливных системах различных ЭУМИ и двигателей сходны. Например, многие двигатели внутреннего сгорания имеют следующие параметры осадков [13]: плотность $\rho_{oc} = 1100...2000$ кг/м³; удельная изобарная теплоемкость $C_{p oc} = 0,84...1,84$ кДж/(кг·К); коэффициент теплопроводности $\lambda_{oc} = 0,17...0,80$ Вт/(м·К); коэффициент температуропроводности $a_{oc} = 3,5 \cdot 10^{-7}$ м²/с.

Средняя плотность кокса от авиационного УВГ, определенная по его твердой части, составляет примерно 0,08 г/см³. Коэффициент теплопроводности осадка, образованного при кипении УВГ, для каждого топлива оказался слабо зависимым как от времени наработки (в пределах первых десяти часов), так и от температуры стенки: для РТ и Т-6 $\lambda_{oc} = 0,29$ Вт/(м·К), для парафиновых УВГ $\lambda_{oc} = 0,36$ Вт/(м·К) [7, 8, 10, 14–16].

Таким образом, углеродосодержащие осадки можно считать своего рода теплоизоляционными химическими соединениями в опреде-

ленном диапазоне коэффициента теплопроводности λ_{oc} , что подтверждено многочисленными экспериментами и опытом эксплуатации топливных систем РД. Необходимо вести борьбу с осадкообразованием уже на начальной стадии проектирования и создания ЭУМИ, двигателей и техносистем. Для этого надо знать природу образования осадков, проводить экспериментальные исследования, правильно и эффективно выбирать способы борьбы с этим нежелательным тепловым процессом. Их можно подразделить на две группы: существующие и перспективные [8].

К первой группе относятся следующие способы: физико-химические (различные виды промывок); физико-механические (разные виды механической очистки); химико-термические (различные виды сжигания осадка в богатом пламени метана и других газов); основанные на уменьшении контакта УВГ с окружающим воздухом, на удалении кислорода из топливных и охлаждающих систем, на заполнении свободного пространства над УВГ инертными газами, на выборе материала стенки, создании полированной поверхности, обеспечении минимального давления при пуске и остановке ЭУМИ и РД, на выборе вида УВГ и специальных присадок.

Основные и самые перспективные способы второй группы базируются на обеспечении расчетного охлаждения нагретой стенки до температуры менее 373 К (до температуры начала появления осадкообразования на металлической стенке [8]), на использовании теплофизических свойств жидких УВГ (УВО) в зоне критического давления, на применении электростатических полей и резервировании участков топливоподающей системы (включая распылители, фильтры и т. п.).

Очевидно, что большинство существующих способов экономически невыгодны, создают трудности, обусловленные простым ЭУМИ и РД, долговременными ремонтными работами с промывкой агрессивными жидкостями, проблемами по их утилизации, что представляет экологическую угрозу для окружающей среды.

Свойства некоторых углеводородных ТН. Известно, что главными химическими элементами углеводородных топлив являются углерод (~86 %) и водород (~13 %). Среди распространенных отечественных авиационных реактивных топлив можно выделить ТС-1, РТ-1, Т-8В и Т-6, а среди зарубежных — Jet-A, Jet-A1, Jet-B,

AVTUR, Jp-4, Jp-5 и Jp-8. При нормальных условиях эксплуатации плотность многих реактивных топлив примерно одинакова и составляет около 800 кг/м^3 , а теплота сгорания $Q_n \approx 43\,000 \text{ кДж/кг}$.

Экспериментально установлено, что реактивные топлива ТС-1, Т-1, Т-2, Т-5 и Т-6 при нагреве выше $100 \text{ }^\circ\text{C}$ интенсивно окисляются, в результате чего образуется твердая фаза — нерастворенные осадки, отложения. Топливо, заправляемое в баки летательного аппарата, должно соответствовать восьмому классу чистоты (по ГОСТ 17116–71) [14, 15].

Среди газообразных УВГ и УВО особое место занимает природный газ, представляющий собой смесь метана, тяжелых углеводородов, азота, паров воды, диоксида углерода и соединений, содержащих серу. При температуре $20 \text{ }^\circ\text{C}$ и нормальном атмосферном давлении удельная низшая теплота сгорания метана $Q_n \approx 33,41 \text{ МДж/м}^3$, а удельная высшая — $Q_v = 37,10 \text{ МДж/м}^3$.

Некоторые теплофизические свойства (плотность ρ при давлении $p = 0,1 \dots 1,0 \text{ МПа}$, коэффициент кинематической вязкости ν , коэффициент динамической вязкости μ , коэффициент теплопроводности λ , удельная изобарная теплоемкость C_p и температура t) двух углеводородных ТН — жидкого ТС-1 и газообразного природного газа — приведены в табл. 1 [17].

Формула для расчета температуры внутренней стенки рубашки охлаждения мультитопливной форсунки. Разработаны форсунки, где применены некоторые способы борьбы и предотвращения осадкообразования [11, 12]. Одним из самых простых и надежных способов является охлаждение стенки топливного канала до приемлемой температуры, равной 373 К (так как температура интенсивного начала образования углеводородосодержащих осадков составляет $100 \text{ }^\circ\text{C}$) [8].

Тепловой поток из камеры сгорания любого РД неизбежно распространяется и в сторону форсуночного блока. При этом плотность теплового потока q может достигать нескольких сотен тысяч Вт/м^2 , вследствие чего форсунки сильно нагреваются. Металл форсунки поглощает тепло и передает его охладителю-горючему, температура которого всегда меньше, чем у ее внешней стенки.

Если принять, что температуры внешней и внутренней стенок форсунки постоянны и равномерно распределены на всех участках, то тепловой баланс можно записать как

$$Q_1 = Q_2 + Q_3, \quad (2)$$

где Q_1 и Q_2 — тепловой поток, поглощаемый металлом форсунки и ТН (например, керосином), Вт ; Q_3 — тепловой поток, отнимаемый от внутренней стенки форсунки ТН (например, керосином), Вт .

В действительности тепловой поток, отнимаемый от внутренней стенки форсунки ТН, может иметь разные значения. Например, его можно представить следующим образом:

$$Q_3 = Q_{в.к} + Q_p, \quad (3)$$

где $Q_{в.к}$ и Q_p — тепловой поток, обусловленный вынужденной конвекцией и радиационным (лучистым) теплообменом, Вт .

При необходимости формула (3) может содержать и другие тепловые потоки. В случае вынужденной конвекции керосина формула (2) без учета лучистого теплообмена от нагретой внутренней стенки принимает следующий вид:

$$\begin{aligned} \frac{M_\phi}{\tau} C_m (T_{wн} - T_{wвн}) = \\ = G_f C_{vf} (T_{wвн} - T_f) + \alpha F_{вн} (T_{wвн} - T_f), \end{aligned} \quad (4)$$

где M_ϕ — сухая масса форсунки, кг ; τ — время, $\tau = 1 \text{ с}$; C_m — удельная теплоемкость материала форсунки, $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$; $T_{wн}$ — температура

Таблица 1

Теплофизические свойства углеводородных ТН

Вид ТН	ρ , кг/м^3 , при давлении $p = 0,1 \dots 1,0 \text{ МПа}$	ν , $\text{мм}^2/\text{с}$	μ , $\text{мПа}\cdot\text{с}$	λ , $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$	C_p , $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{ }^\circ\text{C})$	t , $^\circ\text{C}$
ТС-1	779,60	1,340	1,04000	0,1134	1915,0	20
	713,60	0,555	0,40100	0,1005	2295,0	100
	650,00	0,305	0,19800	0,0844	2702,0	200
Природный газ	0,73	14,300	0,01059	0,0292	1885,0	0
	0,53	24,600	0,01373	0,0421	2095,0	100
	0,37	37,700	0,01619	0,0550	2304,5	200

наружной (внешней) стенки форсунки, К; $T_{w_{вн}}$ — температура внутренней стенки рубашки охлаждения, К; G_f — массовый расход ТН, кг/с; C_{vf} — удельная изохорная теплоемкость ТН, Дж/(кг·К); α — коэффициент теплоотдачи от стенки к ТН, Вт/(м·К); $F_{вн}$ — площадь внутренней поверхности форсунки, контактирующей с ТН, м²; T_f — температура ТН, К.

Из формулы (4) нетрудно выразить температуру внутренней стенки рубашки охлаждения форсунки $T_{w_{вн}}$, охлаждаемой потоком ТН (например, керосина ТС-1 или Т-6) [18]:

$$T_{w_{вн}} = \frac{\frac{M_{\phi}}{\tau} C_M T_{w_n} + T_f (\alpha F_{вн} + G_f C_{vf})}{\alpha F_{вн} + G_f C_{vf} + \frac{M_{\phi}}{\tau} C_M}. \quad (5)$$

В формуле (5) коэффициент теплоотдачи α — среднее значение внутри форсунки, которое можно увеличить с помощью интенсификации теплообмена (например, изменяя шероховатость стенки, применяя электрические поля [19–22] и т. п.).

Для мультитопливной форсунки формулу (5) можно заменить выражением [23]

$$T_{w_{вн}} = \frac{\frac{M_{\phi}}{\tau} C_M T_{w_n} + \sum_{i=1}^n T_{fi} \left(F_{вн i} \sum_{j=1}^m \alpha_{ij} + G_{fi} C_{vfi} \right)}{\frac{M_{\phi}}{\tau} C_M + \sum_{i=1}^n \left(F_{вн i} \sum_{j=1}^m \alpha_{ij} + G_{fi} C_{vfi} \right)}. \quad (6)$$

Здесь n — число теплоносителей; α_{ij} — коэффициент теплоотдачи от стенки к i -му теплоносителю при j -й разновидности.

Например, при учете нескольких факторов коэффициент теплоотдачи к одному ТН можно представить в виде

$$\sum_{j=1}^3 \alpha_{1j} = \alpha_{11} + \alpha_{12} + \alpha_{13}, \quad (7)$$

где α_{11} , α_{12} и α_{13} — коэффициент теплоотдачи от стенки к керосину в условиях вынужденной, электрической конвекции и лучистого теплообмена соответственно, Вт/(м²·К).

Если известны перечисленные параметры, то открывается возможность теоретического предсказания температуры внутренней стенки топливного канала мультитопливной форсунки.

При выводе формулы (6) сделаны следующие допущения: температура внешней стенки форсунки одинакова на всем протяжении; у мультитопливной форсунки толщина стенок между каналами незначительна; температура

внутренних стенок рубашек охлаждения примерно одинакова внутри одной форсунки, т. е. формула (6) показывает ее некое среднее значение; не учитываются направление движения ТН, а также осадкообразование и загрязнения поверхности внутренних каналов форсунки.

При расчете сначала необходимо задаться примерными средними температурами ТН, а затем по таблицам или полученным графикам определить требуемый расход охладителей.

Методика расчета температуры внутренней стенки мультитопливной форсунки. Методика расчета температуры внутренней стенки мультитопливной форсунки (например, рубашки охлаждения) включает в себя следующие этапы:

1) задание массовых расходов ТН G_{fi} на входе в форсунку;

2) задание температур внешней стенки форсунки T_{w_n} и ТН на входе в форсунку T_{f0i} , требуемой температуры внутренней стенки (например, 80 °С); вычисление средней температуры каждого ТН внутри форсунки T_{fmi} ;

3) определение теплофизических свойств каждого ТН по средней температуре на основе справочных данных при заданном давлении [17, 24];

4) расчет площади рубашек охлаждения форсунки $F_{вн i}$, гидравлических диаметров каналов $d_{r i}$ и скорости течения ТН внутри форсунки w_i ;

5) выбор режима течения ТН в конкретном канале форсунки и соответствующей формулы теплообмена; вычисление таких безразмерных параметров, как числа Рейнольдса Re , Прандтля Pr , Нуссельта Nu ;

6) нахождение коэффициента теплоотдачи от стенки к потоку каждого ТН α_i ;

7) определение по формуле (6) примерной средней температуры внутренней стенки мультитопливной форсунки $T_{w_{вн}}$; если температура окажется выше, чем требуемая, то необходимо начать расчет заново с п. 1, увеличив при этом массовый расход одного или нескольких теплоносителей G_{fi} на входе в форсунку.

Расчет завершается, когда полученная температура внутренней стенки форсунки $T_{w_{вн}}$ равна заданному требуемому значению.

Расчет температуры внутренней стенки форсунки. Проведен расчет температуры внутренней стенки топливного канала ОТФ и ДТФ, имеющих одинаковую массу и выполненных

из одного и того же материала. У ОТФ в топливном канале находится керосин ТС-1, у ДТФ в первом канале — горючее (керосин ТС-1), во втором — ТН (керосин ТС-1 или природный газ). Причем каналы ОТФ и ДТФ одинаковы по площади внутренней поверхности ($F_{вн} = 0,047 \text{ м}^2$) и гидравлическому диаметру ($d_r = 0,015 \text{ м}$).

При этом сухая масса форсунок $M_f = 0,3 \text{ кг}$, удельная теплоемкость их материала (стали) $C_m = 500 \text{ Дж/(кг·К)}$, температура их внешней стенки $T_{wн} = 920 \text{ К}$. Давление ТН $p = 0,1 \dots 1,0 \text{ МПа}$, температура всех ТН на входе в форсунку $T_{fn} = 293 \text{ К}$. Расчетная заданная температура внутренней стенки топливных каналов (рубашки охлаждения) $T_{wвн} = 353 \text{ К}$ (80 °С). По средней температуре ТН внутри нагретой форсунки выбраны удельная теплоемкость, плотность, коэффициент теплопроводности и коэффициент кинематической вязкости в данном канале.

Массовый расход керосина ТС-1 G_f варьировался, в зависимости от которого менялся и коэффициент теплоотдачи α . Массовый расход керосина в ОТФ равнялся сумме расходов ТН в ДТФ (для лучшего сравнения эффективности охлаждения). Результаты расчетов температуры внутренней стенки форсунки штатной ОТФ (см. рис. 2) и ДТФ (см. рис. 3) приведены на рис. 5 и 6. Там же показана граница осадкообразования (горизонтальная линия). Для определения чисел Рейнольдса, Прандтля и Нус-

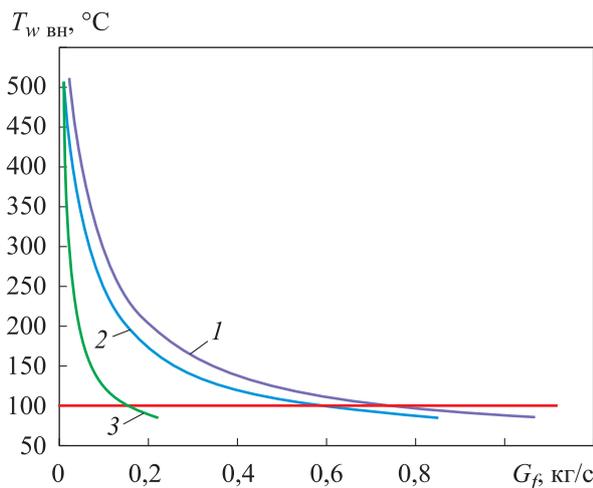


Рис. 5. Зависимости:

- 1 — температуры внутренней стенки топливного канала штатной ОТФ от массового расхода керосина;
- 2 — температуры внутренней стенки первого топливного канала ДТФ от массового расхода керосина;
- 3 — температуры внутренней стенки второго топливного канала ДТФ от массового расхода природного газа

сельта использованы формулы, описывающие режим течения потока в каналах [19, 20].

Из рис. 5 и 6 видно, что при применении двух ТН эффективность охлаждения внутренней стенки форсунки выше, чем при использовании только одного горючего (ТН) в виде керосина при одной и той же массе форсунок и одинаковой внешней температуре поверхности.

Расчетные значения массового расхода ТН, требуемого для достижения в топливных каналах ОТФ и ДТФ температуры внутренней стенки $T_{wвн} \approx 373 \text{ К}$, приведены в табл. 2.

Указанные в табл. 2 данные — чисто теоретические, без учета местных потерь давления.

Формулу (6) и разработанную методику можно применять и для ОТФ с дополнительной рубашкой охлаждения. В качестве примера на рис. 7 показана конструктивная схема ОТФ

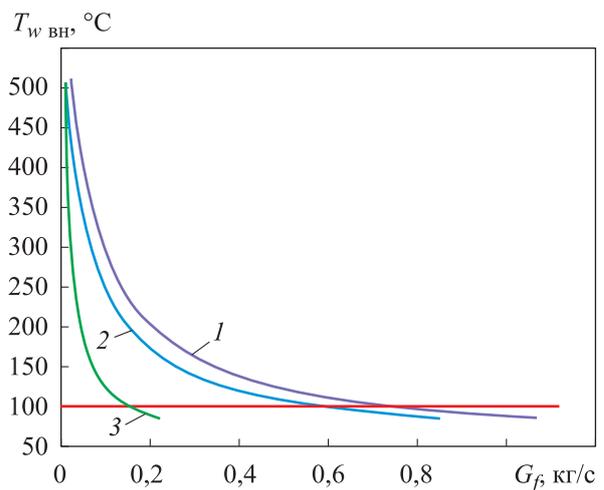


Рис. 6. Зависимости:

- 1 — температуры внутренней стенки топливного канала ОТФ от массового расхода керосина; 2 и 3 — температуры внутренней стенки первого и второго топливных каналов ДТФ от массового расхода керосина

Таблица 2

Расчетные значения массового расхода ТН, требуемого для достижения в топливных каналах форсунок температуры внутренней стенки $T_{wвн} \approx 373 \text{ К}$

Вид форсунки	ТН	Массовый расход, кг/с
Однотопливная	Керосин ТС-1	0,77
Двухтопливная	Керосин ТС-1	0,56
	Природный газ	0,15
Двухтопливная	Керосин ТС-1	0,61
	Керосин ТС-1	0,16

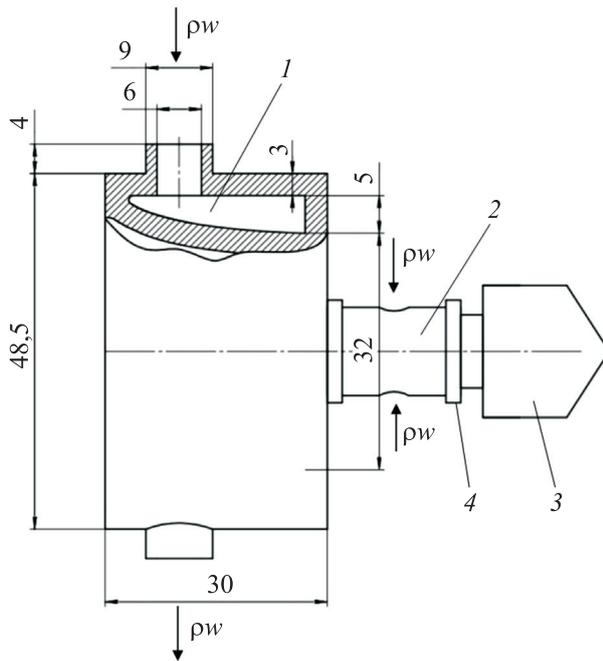


Рис. 7. Конструктивная схема ОТФ с рубашкой регенеративного охлаждения:
1 — рубашка охлаждения; 2 — топливный канал;
3 — гайка; 4 — корпус;
 ρ_w — массовая скорость прокачки УВГ, кг/(м²с)

двигателя НК-8 с рубашкой регенеративного охлаждения.

Проведен расчет средней температуры внутренней стенки такой ОТФ. В качестве исходных использованы следующие данные: горючее — ТС-1; гидравлический диаметр топливного канала $d_r = 0,01$ м; площадь внутренней поверхности топливного канала $F_{вн} = 6,3 \cdot 10^{-4}$ м²; гидравлический диаметр рубашки охлаждения отражателя $d_{г.р.о} = 0,01$ м, площадь внутренней поверхности рубашки охлаждения отражателя $F_{вн.о} = 2,1 \cdot 10^{-3}$ м², сухая масса форсунки $M_f = 0,1$ кг; удельная теплоемкость ее материала (стали) $C_m = 500$ Дж/(кг·К); давление ТН $p = 0,1 \dots 1,0$ МПа; температура внешней стенки форсунки $T_{wн} = 920$ К. Температура всех ТН на входе в форсунку $T_{fm} = 293$ К. Расчетная заданная температура внутренней стенки каналов (рубашки охлаждения) $T_{wвн} = 353$ К.

По средней температуре ТН внутри нагретой форсунки выбраны удельная теплоемкость, плотность, коэффициент теплопроводности и коэффициент кинематической вязкости в данном канале. Массовый расход керосина ТС-1 G_f варьировался, поэтому менялся и коэффициент теплоотдачи α (массовый расход керосина в ОТФ без рубашки охлаждения равен сумме массовых расходов керосина в рубашке охлаждения

и в главном топливном канале — для лучшего сравнения эффективности охлаждения).

Результаты расчетов по формуле (6) при отсутствии и наличии рубашки охлаждения приведены на рис. 8. Там же показана граница осадкообразования (горизонтальная линия).

Аналогично можно утверждать, что при одинаковой сухой массе у форсунки с дополнительным каналом подвода топлива эффективность охлаждения выше, чем у форсунки с одним каналом (см. рис. 8).

Следует отметить, что пропускная способность главного топливного канала, например, внутри корпуса (см. рис. 2), всегда ограничена, поэтому форсунку с одним каналом нельзя эффективно охладить.

Безусловно, результаты расчета свидетельствуют о перспективности разработки и дальнейшей эксплуатации мультитопливных форсунок. Также можно увеличивать не только площади рубашек охлаждения, но и коэффициент теплоотдачи α , входящий в состав формул (5) и (6), например, за счет электрической конвекции [21, 22].

Таким образом, открывается возможность оперативного нахождения температуры стенки топливного канала на основе теоретической формулы (6) с целью поддержания работоспособности мультитопливной форсунки и предотвращения осадкообразования в канале подачи жидкого УВГ (УВО).

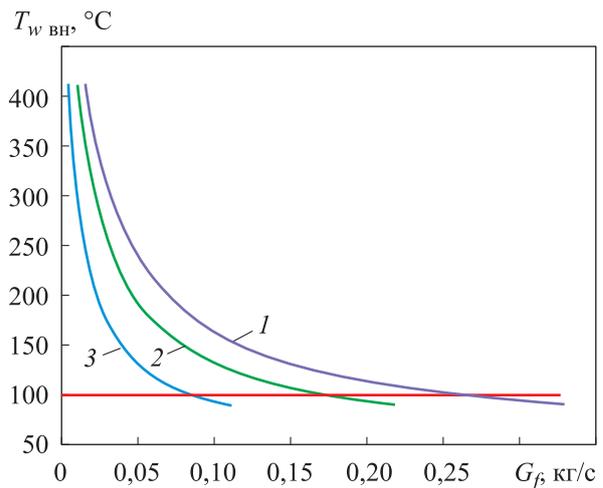


Рис. 8. Результаты расчетов по формуле (6) при отсутствии и наличии рубашки охлаждения форсунки:

1 — зависимость внутренней стенки топливного канала штатной ОТФ (см. рис. 2) от массового расхода керосина; 2 и 3 — зависимости внутренней стенки топливного канала ОТФ (см. рис. 7) от массового расхода керосина в рубашке охлаждения и одном канале

Выводы

1. Проведен анализ процесса образования углеродосодержащих осадков внутри жидких УВГ и на стенках топливоподающих каналов.

2. Сделано обобщение известных способов борьбы и предотвращения осадкообразования. Рассмотрен один из способов эффективного предотвращения осадкообразования — охлаждение металлической стенки топливного канала менее 373 К.

3. Выведена формула для расчета температуры внутренней стенки рубашки охлаждения мультитопливной форсунки. На базе этой формулы разработана методика теоретического определения температуры внутренних каналов и

рубашки охлаждения форсунок, подвергающихся интенсивному нагреву в ходе эксплуатации.

4. На основе разработанной формулы выполнен теоретический расчет температуры стенки рубашки охлаждения ОТФ и ДТФ с разными ТН при одной и той же сухой массе форсунок и одинаковой внешней температуре поверхности. Сделано соответствующее обобщение в виде графиков. Проведен дополнительный расчет температуры внутренней стенки ОТФ при отсутствии и наличии рубашки регенеративного охлаждения.

5. Результаты расчета свидетельствуют о лучшей эффективности ДТФ по сравнению с ОТФ. Намечены пути дальнейших теоретических и экспериментальных исследований.

Литература

- [1] Малыгина М.В. Численное исследование многотопливного горелочного модуля камеры сгорания ГТУ. *Вестник СГАУ*, 2011, № 3-1, с. 143–150.
- [2] Мурашев П.М. *Многотопливная форсунка для газотурбинных двигателей и установок*. Патент РФ 110818. Заявл. 29.06.2011, опубл. 27.11.2011.
- [3] Бурдыкин В.Д., Козлов В.Г., Кондрашова Е.В. *Многотопливная форсунка*. Патент РФ 166189. Заявл. 09.03.2016, опубл. 20.11.2016.
- [4] Мальчук В.И., Шатров М.Г., Кудряшов Б.А., Скороделов С.Д. *Форсунка для подачи двух видов топлива в дизельный двигатель*. Патент РФ 2541674. Заявл. 31.12.2013, опубл. 20.02.2015.
- [5] Стасюк А.В., Калашник Н.Н., Приладышев Д.Ю. и др. *Форсунка двухтопливная «газ плюс жидкое топливо»*. Патент РФ 2578785. Заявл. 27.10.2014, опубл. 27.03.2016.
- [6] Алтунин К.В. *Функционально-стоимостной анализ горелочных устройств и форсунок*. Казань, КНИТУ-КАИ, 2020. 156 с.
- [7] Яновский Л.С., Иванов В.Ф., Галимов Ф.М. и др. *Коксоотложения в авиационных и ракетных двигателях*. Казань, Абак, 1999. 284 с.
- [8] Алтунин В.А. *Исследование особенностей теплоотдачи к углеводородным горючим и охладителям в энергетических установках многократного использования*. Кн. 1. Казань, КГТУ им. В.И. Ульянова-Ленина, 2005. 272 с.
- [9] Van Nostrand W.Z., Leach S.H., Haluske J. Economic penalty associated with the fouling of refinery heat transfer equipment. In: *Fouling of heat transfer equipment*. Hemisphere, 1981, pp. 619–643.
- [10] Чертков Я.Б. *Современные и перспективные углеводородные реактивные и дизельные топлива*. Москва, Химия, 1968. 356 с.
- [11] Алтунин К.В. *Форсунка*. Патент РФ 2388966. Заявл. 02.12.2008, опубл. 10.05.2010.
- [12] Алтунин К.В. *Форсунка*. Патент РФ 2447362. Заявл. 26.07.2010, опубл. 10.04.2012.
- [13] Kalghatgi G.T. Combustion chamber deposits in spark-ignition engines: a literature review. *SAE Tech. Paper*, 1995, no. 952443, doi: <https://doi.org/10.4271/952443>
- [14] Харин А.А. *Химмотологическое обеспечение надежности авиационных газотурбинных двигателей*. Москва, Европейский центр по качеству, 2002. 288 с.
- [15] Дубовкин Н.Ф., Яновский Л.С., Харин А.А. и др. *Топлива для воздушно-реактивных двигателей*. Москва, МАТИ, 2001. 443 с.
- [16] Яновский Л.С., Харин А.А., Бабкин В.И. *Основы химмотологии*. Москва-Берлин, Директ-Медиа, 2016. 484 с.
- [17] Дубовкин Н.Ф., Маланичева В.Г., Массур Ю.П., Федоров Е.П. *Физико-химические и эксплуатационные свойства реактивных топлив*. Москва, Химия, 1985. 240 с.

- [18] Алтунин К.В. Теоретический расчет температуры стенки топливного канала форсунки с целью предотвращения осадкообразования. *LXXIV Межд. науч. чтения. Сб. ст. межд. науч.-практ. конф.* Москва, ЕФИР, 2020, с. 36–38.
- [19] Савин И.К. *Теоретические основы теплотехники (краткий курс). Ч. II. Теплопередача.* Петрозаводск, Изд-во ПетрГУ, 2008. 172 с.
- [20] Бухмиров В.В. *Расчет коэффициента теплоотдачи.* Иваново, ИГЭУ, 2007. 37 с.
- [21] Алтунин В.А., Алтунин К.В., Алиев И.Н. и др. Анализ исследований электрических полей в различных средах и условия. *Инженерно-физический журнал*, 2012, т. 85, № 4, с. 881–896.
- [22] Алтунин К.В. Разработка критериального уравнения вынужденного движения керосина с новым числом подобия электроконвекции. *Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева*, 2020, № 3, с. 30–33.
- [23] Алтунин К.В. Разработка формулы расчета температуры внутренней стенки мульти-топливной форсунки с целью предотвращения осадкообразования и перегрева. *Инновационные научные исследования*, 2020, № 12-1 (2), с. 68–79.
- [24] Шадрина Е.М., Волкова Г.В. *Определение теплофизических свойств газов, жидкостей и водных растворов веществ.* Иваново, ИГХТУ, 2009. 80 с.

References

- [1] Malygina M.V. Numerical investigation multifuel combustion gas turbine combustion chamber module. *Vestnik SGAU [Vestnik of Samara University]*, 2011, no. 3-1, pp. 143–150 (in Russ.).
- [2] Murashev P.M. *Mnogotoplivnaya forsunka dlya gazoturbinnnykh dvigateley i ustanovok* [Multi-fuel nozzle for gas-turbine engines and plants]. Patent RU 110818. Appl. 29.06.2011, publ. 27.11.2011.
- [3] Burdykin V.D., Kozlov V.G., Kondrashova E.V. *Mnogotoplivnaya forsunka* [Multi-fuel nozzle]. Patent RU 166189. Appl. 09.03.2016, publ. 20.11.2016.
- [4] Mal'chuk V.I., Shatrov M.G., Kudryashov B.A., Skorodelov S.D. *Forsunka dlya podachi dvukh vidov topliva v dizel'nyy dvigatel'* [Input nozzle for two types of fuel into diesel engine]. Patent RU 2541674. Appl. 31.12.2013, publ. 20.02.2015.
- [5] Stasyuk A.V., Kalashnik N.N., Priladyshev D.Yu., et al. *Forsunka dvukhtoplivnaya «gaz plyus zhidkoe toplivo»* [Two-fuel nozzle “gas plus liquid fuel”]. Patent RU 2578785. Appl. 27.10.2014, publ. 27.03.2016.
- [6] Altunin K.V. *Funktsional'no-stoimostnoy analiz gorelochnykh ustroystv i forsunok* [Functional-cost analysis for burner devices and nozzles]. Kazan', KNITU-KAI Publ., 2020. 156 p.
- [7] Yanovskiy L.S., Ivanov V.F., Galimov F.M., et al. *Koksootlozheniya v aviatsionnykh i raketnykh dvigatelyakh* [Carbon deposit in aviation and rocket engines]. Kazan', Abak Publ., 1999. 284 p.
- [8] Altunin V.A. *Issledovanie osobennostey teplootdachi k uglevodorodnym goryuchim i okhladitelyam v energeticheskikh ustanovkakh mnogorazovogo ispol'zovaniya. Kn. 1* [Study on properties of thermal transfer to hydrocarbon fuel and coolants in reusable power plants. Vol. 1]. Kazan', KGTU im. V.I. Ul'yanova-Lenina Publ., 2005. 272 p.
- [9] Van Nostrand W.Z., Leach S.H., Haluske J. Economic penalty associated with the fouling of refinery heat transfer equipment. In: *Fouling of heat transfer equipment*. Hemisphere, 1981, pp. 619–643 (in Russ.).
- [10] Chertkov Ya.B. *Sovremennye i perspektivnye uglevodorodnye reaktivnye i dizel'nye topliva* [Modern and promising hydrocarbon jet and diesel fuels]. Moscow, Khimiya Publ., 1968. 356 p.
- [11] Altunin K.V. *Forsunka* [Nozzle]. Patent RU 2388966. Appl. 02.12.2008, publ. 10.05.2010.
- [12] Altunin K.V. *Forsunka* [Nozzle]. Patent RU 2447362. Appl. 26.07.2010, publ. 10.04.2012.
- [13] Kalghatgi G.T. Combustion chamber deposits in spark-ignition engines: a literature review. *SAE Tech. Paper*, 1995, no. 952443, doi: <https://doi.org/10.4271/952443>
- [14] Kharin A.A. *Khimmotologicheskoe obespechenie nadezhnosti aviatsionnykh gazoturbinnnykh dvigateley* [Chemmotologic reliability assurance of aviation gas turbine engines]. Moscow, Evropeyskiy tsentr po kachestvu Publ., 2002. 288 p.

- [15] Dubovkin N.F., Yanovskiy L.S., Kharin A.A., et al. *Topliva dlya vozduшно-reaktivnykh dvigateley* [Fuels for aerjet engines]. Moscow, MATI Publ., 2001. 443 p.
- [16] Yanovskiy L.S., Kharin A.A., Babkin V.I. *Osnovy khimmotologii* [Fundamentals of chemmotology]. Moscow-Berlin, Direkt-Media Publ., 2016. 484 p.
- [17] Dubovkin N.F., Malanicheva V.G., Massur Yu.P., Fedorov E.P. *Fiziko-khimicheskie i ekspluatatsionnye svoystva reaktivnykh topliv* [Physical-chemical and exploitation properties of jet fuels]. Moscow, Khimiya Publ., 1985. 240 p.
- [18] Altunin K.V. [Theoretical evaluation of fuel canal wall temperature of a nozzle in order to prevent deposit formation]. *LXXIV Mezhd. nauch. chten. Sb. st. mezhd. nauch.-prakt. konf.* [LXXIV Int. Sci. Readings. Proc. Int. Sci.-Pract. Conf.]. Moscow, EFIR, 2020, pp. 36–38 (in Russ.).
- [19] Savin I.K. *Teoreticheskie osnovy teplotekhniki (kratkiy kurs). Ch. II. Teploperedacha* [Theoretical foundations of thermal engineering (short course). P. II. Heat transfer]. Petrozavodsk, Izd-vo PetrGU Publ., 2008. 172 p.
- [20] Bukhmirov V.V. *Raschet koeffitsienta teplootdachi* [Calculation of heat transfer coefficient]. Ivanovo, IGEU Publ., 2007. 37 p.
- [21] Altunin V.A., Altunin K.V., Aliev I.N., et al. Analysis of investigations of electric fields in different media and conditions. *Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal*, 2012, vol. 85, no. 4, pp. 881–896 (in Russ.). (Eng. version: *J. Eng. Phys. Thermophy.*, 2012, vol. 85, no. 4, pp. 959–979, doi: <https://doi.org/10.1007/s10891-012-0736-4>)
- [22] Altunin K.V. Elaboration of a criterion equation for forced kerosene motion with a new electric convection number. *Vestnik KGTU im. A.N. Tupoleva* [Vestnik of KNRTU n.a. A.N. Tupolev], 2020, no. 3, pp. 30–33 (in Russ.).
- [23] Altunin K.V. Razrabotka formuly rascheta temperatury vnutrenney stenki mul'titoplivnoy forsunki s tsel'yu predotvrashcheniya osadkoobrazovaniya i peregreva. *Innovatsionnye nauchnye issledovaniya*, 2020, no 12-1 (2), pp. 68–79 (in Russ.).
- [24] Shadrina E.M., Volkova G.V. *Opreделение teplofizicheskikh svoystv gazov, zhidkostey i vodnykh rastvorov veshchestv* [Evaluation of thermal-physical properties of gases, liquids and water solutions]. Ivanovo, IGKhTU Publ., 2009. 80 p.

Статья поступила в редакцию 29.01.2021

Информация об авторе

АЛТУНИН Константин Витальевич — кандидат технических наук, доцент кафедры «Теплотехника и энергетическое машиностроение», КНИТУ им. А.Н. Туполева — КАИ (420011, Казань, Российская Федерация, ул. К. Маркса, д. 10, e-mail: altkonst881@yandex.ru).

Information about the author

ALTUNIN Konstantin Vitalievich — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Heat and Power Engineering Department. Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev — KAI (420111, Kazan, Russian Federation, K. Marx St., Bldg. 10, e-mail: altkonst881@yandex.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Алтунин К.В. Разработка методики расчета температуры внутренней стенки мультитопливной форсунки с целью предотвращения осадкообразования и перегрева. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2021, № 6, с. 37–47, doi: [10.18698/0536-1044-2021-6-37-47](https://doi.org/10.18698/0536-1044-2021-6-37-47)

Please cite this article in English as:

Altunin K.V. Development of a Technique for Calculating the Temperature of the Multi-Fuel Nozzle Inner Wall in order to Prevent Sedimentation and Overheating. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2021, no. 6, pp. 37–47, doi: [10.18698/0536-1044-2021-6-37-47](https://doi.org/10.18698/0536-1044-2021-6-37-47)