

Разработка методики расчета температуры внутренней стенки мультитопливной форсунки с учетом плотности теплового потока

© К.В. Алтунин

Казанский национальный исследовательский технический университет имени А.Н. Туполева — КАИ, г. Казань, 420111, Россия

Представлена разработка новой методики расчета температуры внутренней стенки мультитопливной форсунки на основе данных по плотности теплового потока. Проведены патентный поиск и анализ научно-технической информации по многотопливным форсункам. Установлено, что одним из эффективных способов предотвращения появления и стремительного образования углеродсодержащих осадков в жидких углеводородных горючих является снижение температуры металлической стенки. Получены новые формулы для расчета температуры внутренней поверхности в зависимости от количества теплоносителей и их теплофизических свойств, геометрических характеристик каналов подачи и «сухой» массы форсунки. Проведен сравнительный теоретический расчет снижения температуры внутри однопаливной и двухпаливной форсунок при разных массовых расходах керосина. Полученные результаты свидетельствуют о большей эффективности охлаждения мультитопливных форсунок по сравнению с однопаливными.

Ключевые слова: мультитопливная форсунка, температура внутренней стенки, теплоноситель, углеводородное горючее

Введение. В настоящее время многие реактивные двигатели, включая воздушно-реактивные двигатели (ВРД), продолжают работать на топливах из смеси воздуха и углеводородного горючего (УВГ). Такие жидкие УВГ, как керосины разных марок и характеристик, хорошо зарекомендовали себя в авиации. Для обеспечения должного распыла жидкие УВГ доставляются в камеру сгорания (КС) распыленными через форсунки.

Штатная форсунка ВРД НК-8-2У «Ту-154» и ее схема приведены на рис. 1. Проблемами таких и подобных им форсунок являются нагрев стенок при длительной и многократной эксплуатации и, как следствие, выход из строя фильтров и распылителей из-за осадкообразования. Образование углеродсодержащих осадков на металлических стенках топливных каналов — сложный теплофизический и электрохимический процесс, зависящий от многих факторов, главным из которых является температура [1–4]. Многие авторы в своих работах отмечали, что 373К — начальная температура осадкообразования на нагретой металлической стенке.

Точный расчет толщины осадков на нагретых стенках топливных каналов — задача довольно сложная, так как требуется проведение

множества экспериментов. Автором статьи предложена методика расчета толщины слоя углеродсодержащих осадков в топливных каналах тепловых двигателей и энергоустановок на основе удельного электросопротивления слоев осадка [5], так как осадкообразование, безусловно, влияет на теплоотдачу к жидкому УВГ от нагретой стенки топливного канала.

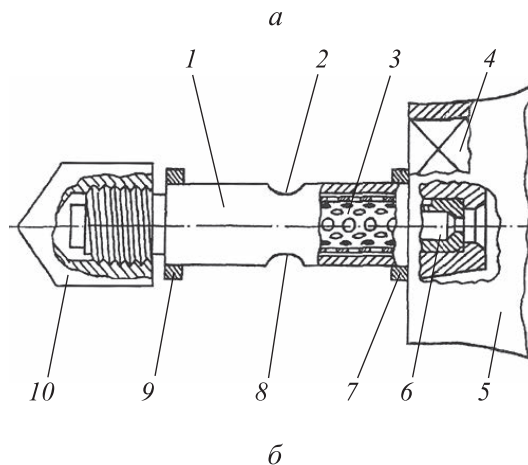


Рис. 1. Общий вид струйной форсунки ВРД НК-8-2У с распылителем и фильтром (а) и ее схема (б):

1 — корпус; 2, 8 — отверстия для подвода топлива; 3 — топливный сетчатый фильтр; 4 — лопатки завихрителя; 5 — смешительная втулка; 6 — центробежный распылитель; 7, 9 — уплотнительные кольца; 10 — гайка

В настоящее время существует ряд изобретений, в которых изложены технические решения, обеспечивающие наружное охлаждение форсунок, однако с их помощью не удастся полностью справиться с проблемой осадкообразования внутри топливных каналов этих устройств. Например, разработана многофункциональная топливная форсунка для газотурбинного двигателя [6], в которой головка форсунки 6 может быть размещена вниз по потоку (рис. 2). Тепловой щит 4 устанавливается на головку форсунки; множество охлаждающих каналов 2 размещены между передней кромкой 5 головки форсунки и соответствующей задней стороной теплового щита 3 для подачи охлаждающего воздуха через окна 1 на переднюю часть устройства распылителя в многофункциональной топливной форсунке (см. рис. 2).

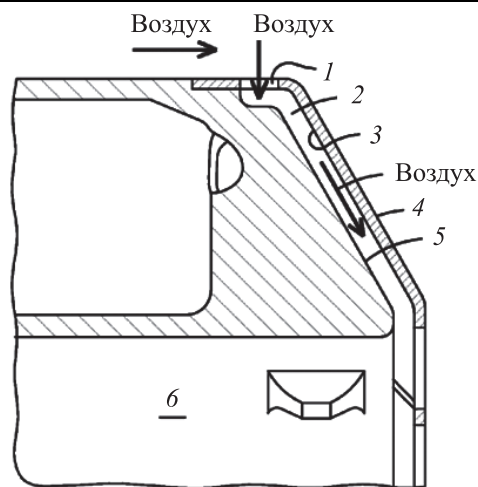


Рис. 2. Схема многофункциональной топливной форсунки с тепловым щитом

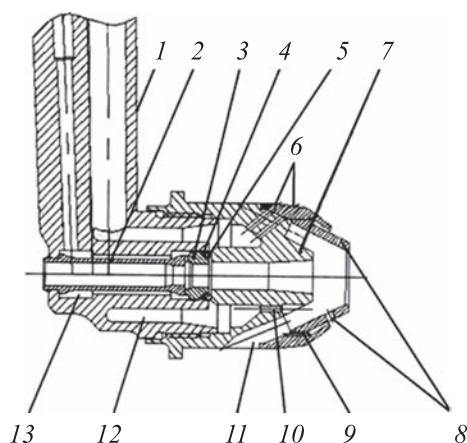


Рис. 3. Форсунка двухтопливная типа газ + жидкое топливо:

1 — корпус; 2 — втулка; 3 — распылитель; 4 — кольцо уплотнительное; 5 — шайба; 6, 10 — газораздающие отверстия; 7 — кожух; 8, 9 — ряд отверстий; 11 — пазы в качестве распылителя; 12, 13 — кольцевые камеры

Автором статьи разработаны и запатентованы конструктивные схемы форсунок ВРД, в которых может быть применено несколько способов борьбы с осадкообразованием (закоксовыванием топливно-подающих каналов) и его предотвращения, включая теплоизоляцию топливных фильтров, резервирование распылителей и фильтров, эффективное регенеративное охлаждение с помощью рубашки охлаждения и др. [4, 7–11]. Однако применение однотопливных форсунок (ОТФ) сопряжено с рядом проблем, например, с невысоким уровнем охлаждения, зависимость только от одного горючего, которое может уже содержать частицы осадков и быть ненадлежащего качества, и т. п.

В настоящее время приобрела актуальность разработка мультитопливных (многотопливных) форсунок (МТФ) [12–16], которые могли бы одновременно или попеременно доставлять в КС разные горючие, а также эффективно охлаждаться от дополнительных теплоносителей (ТН), протекающих через них. На рис. 3 показана схема двухтопливной форсунки (ДТФ) по патенту [16], в которой можно организовать эффективную подачу газообразного и жидкого топлива в КС двигателя.

Цель работы — разработка методики расчета температуры внутренней стенки мультитопливной форсунки с учетом плотности теплового потока.

Формулы расчета температуры внутренней стенки мульти-топливной форсунки. Ранее была получена формула для расчета средней температуры на внутренней поверхности МТФ $T_{w_{вн}}$ [17]:

$$T_{w_{вн}} = \frac{\frac{M_{\phi}}{\tau} C_M T_{wh} + \sum_{i=1}^n T_{fi} (F_{внi} \sum_{j=1}^m \alpha_{ij} + G_{fi} C_{vf_i})}{\frac{M_{\phi}}{\tau} C_M + \sum_{i=1}^n (F_{внi} \sum_{j=1}^m \alpha_{ij} + G_{fi} C_{vf_i})}, \quad (1)$$

где M_{ϕ} — «сухая» масса форсунки, кг; τ — время, $\tau = 1$ с; C_M — удельная теплоемкость материала форсунки, Дж/(кг · К); T_{wh} — температура наружной поверхности форсунки, К; T_{fi} — температура i -го ТН, К; $F_{внi}$ — площадь внутренней поверхности форсунки, контактирующей с i -м ТН, м²; G_{fi} — массовый расход i -го ТН, кг/с; C_{vf_i} — удельная теплоемкость i -го ТН, Дж/(кг · К); n — количество i -х ТН; $\sum_{j=1}^m \alpha_{ij}$ — сумма коэффициентов теплоотдачи к i -м теплоносителям при j -й разновидности, например, при учете нескольких факторов коэффициент теплоотдачи к одному теплоносителю можно представить как сумму $\sum_{j=1}^3 \alpha_{1j} = \alpha_{11} + \alpha_{12} + \alpha_{13}$ (α_{11} — коэффициент теплоотдачи к керосину вследствие вынужденной конвекции, Вт/(м² · К), α_{12} — коэффициент теплоотдачи к керосину за счет электрической конвекции, Вт/(м² · К), α_{13} — коэффициент теплоотдачи к керосину посредством лучистого теплообмена, Вт/(м² · К) и т. д.).

Формулу (1) можно переписать следующим образом:

$$T_{w_{вн}} = \frac{\frac{M_{\phi}}{\tau} \frac{C_M T_{wh}}{G_{fi} C_{vf_i}} + \sum_{i=1}^n T_{fi} (NTU_i + 1)}{\frac{M_{\phi}}{\tau} \frac{C_M}{G_{fi} C_{vf_i}} + \sum_{i=1}^n (NTU_i + 1)}, \quad (2)$$

где $NTU_i = \frac{F_{внi} \alpha_i}{G_{fi} C_{pf_i}}$ — число теплообменных единиц ($C_{vf_i} = C_{pf_i}$

для несжимаемой жидкости) [18].

В формулу (2) входит параметр NTU , который является мерой эффективности теплообменных систем. Если $NTU > 5$, то на выходе из канала температура ТН становится практически равной температуре

поверхности этого канала (при постоянной внешней температуре стенки), при $NTU = 5$ будет достигнут предел для теплоотдачи [18]. Таким образом, открывается возможность теоретически предсказать температуру внутренней стенки топливного канала МТФ, если известны перечисленные параметры. Однако не всегда известно точное значение температуры нагретого корпуса форсунки (например, в связи с выходом из строя датчиков контроля температуры и т. п.). В этом случае необходимо знать значение плотности теплового потока q [Вт/м²]. Запишем выражение (1) с граничным условием 3-го рода:

$$\left\{ \begin{array}{l} T_{w_{BH}} = \frac{\frac{M_{\phi}}{\tau} C_M T_{wH} + \sum_{i=1}^n T_{fi} \left(F_{BH_i} \sum_{j=1}^m \alpha_{ij} + G_{fi} C_{vf_i} \right)}{\frac{M_{\phi}}{\tau} C_M + \sum_{i=1}^n \left(F_{BH_i} \sum_{j=1}^m \alpha_{ij} + G_{fi} C_{vf_i} \right)}; \\ \alpha_k (T_{fk} - T_{wH}) = \frac{\lambda_{\phi}}{l_{\phi}} (T_{wH} - T_{w_{BH}}), \end{array} \right. \quad (3)$$

где α_k — коэффициент теплоотдачи к корпусу форсунки извне, Вт/(м² · К); T_{fk} — температура окружающей среды, К; λ_{ϕ} — коэффициент теплопроводности материала форсунки, Вт/(м · К); l_{ϕ} — определяющая толщина стенки форсунки (без диаметров внутренних каналов), м.

В случае, если известна q к корпусу форсунки, справедливо выражение

$$q = \frac{\lambda_{\phi}}{l_{\phi}} (T_{wH} - T_{w_{BH}}), \quad (4)$$

откуда

$$T_{wH} = \frac{ql_{\phi}}{\lambda_{\phi}} + T_{w_{BH}}. \quad (5)$$

После подстановки (5) в (3) при условии равенства всех T_{fi} , например одинаковые начальные или средние температуры в каждом канале, получим

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

С учетом параметра NTU выражение (6) приобретает вид

$$T_{w\text{вн}} = T_{f_i} + \frac{\frac{M_\phi}{\tau} C_M \left(\frac{ql_\phi}{\lambda_\phi} \right)}{\sum_{i=1}^n G_{f_i} C_{vf_i} (NTU_i + 1)}. \quad (7)$$

Из (7) нетрудно установить минимально возможную температуру внутренней поверхности МТФ (при $NTU_i = 5$):

$$T_{w\text{внmin}} = T_{f_i} + \frac{\frac{M_\phi}{\tau} C_M \left(\frac{ql_\phi}{\lambda_\phi} \right)}{6 \sum_{i=1}^n (G_{f_i} C_{vf_i})}. \quad (8)$$

Как видно, для нахождения (8) не требуется расчет α_{ij} и $F_{\text{вн}i}$.

Необходимо отметить, что при выводе формул (1)–(8) сделаны следующие допущения:

- 1) температура внешней поверхности форсунки одинакова на всем протяжении;
- 2) в случае МТФ толщина стенок между каналами незначительна;
- 3) формулы (1), (2), (6), (7) показывают некую среднюю температуру внутренней полости форсунки;
- 4) направление движения ТН не учитывается;
- 5) значения теплофизических параметров ТН и материала корпуса форсунки взяты при приблизительной средней температуре.

Определяющая толщина стенки l_ϕ может быть взята по средней толщине стенки корпуса МТФ или рассчитана по формуле

$$l_\phi = 2 \left(\frac{A_{s\phi}}{\Pi_\phi} - \sum_{i=1}^n \frac{A_{si}}{\Pi_i} \right), \quad (9)$$

где $A_{s\phi}$ — площадь наибольшего поперечного сечения форсунки, м^2 ; Π_ϕ — периметр наибольшего поперечного сечения форсунки, м ; A_{si} — площадь поперечного сечения i -го канала форсунки, м^2 ; Π_i — периметр поперечного сечения i -го канала форсунки, м .

Таким образом, открывается возможность теоретического определения температуры внутренней стенки топливного канала форсунки, если известны лишь перечисленные параметры. При расчете сначала необходимо задать примерные средние температуры теплоносителей, а затем по таблицам или полученным графикам определить требуемый расход ТН.

Методика расчета температуры внутренней стенки мультитопливной форсунки с учетом плотности теплового потока. Методика расчета температуры внутренней стенки мультитопливной форсунки на основе плотности теплового потока имеет следующий алгоритм:

1) сначала задают массовый расход теплоносителей G_{fi} на входе в форсунку, «сухую» массу и примерные габаритные размеры форсунки, плотность теплового потока q к корпусу форсунки, теплоемкость, коэффициент теплопроводности материала форсунки;

2) рассчитывают или задают примерную определяющую толщину стенки форсунки l_{ϕ} ;

3) задают температуру теплоносителей T_{f0i} на входе в форсунку, требуемую температуру внутренней стенки (например 80 °С); подбирают среднюю температуру каждого теплоносителя внутри форсунки T_{fmi} ;

4) по средней температуре каждого теплоносителя на основе справочных данных находят его теплофизические свойства при заданном давлении;

5) рассчитывают внутренние площади каналов или рубашек охлаждения форсунки $F_{внi}$, вычисляют гидравлические диаметры каналов d_{Ti} и внутри них скорости течения теплоносителей W_i ;

6) выбирают режим течения теплоносителя в конкретном канале форсунки и соответствующую формулу теплообмена; вычисляют безразмерные числа теплообмена, например, при вынужденной конвекции ТН — Re, Pr, Nu;

7) вычисляют коэффициент теплоотдачи α_i от стенки к потоку каждого ТН;

8) рассчитывают примерную среднюю температуру внутренней стенки МТФ T_{wBH} по формуле (6) или (7); в случае, если данная температура оказывается выше требуемой, следует провести расчет заново с п.1, увеличив массовый расход одного или нескольких теплоносителей G_{fi} на входе в форсунку или изменив другие параметры (например, число каналов и ТН, q и т. п.); в случае, если хотя бы одна кривая температуры T_{wBH} МТФ, рассчитанной по (6) или (7), выходит за пределы кривой для ОТФ (например, начальная точка находится выше), необходимо снизить q до приемлемых значений.

Расчет завершается, когда вычисленная температура внутренней стенки форсунки T_{wBH} равна требуемой заданной температуре этой стенки.

Апробация новой методики расчета температуры внутренней стенки мультитопливной форсунки. Проведен расчет температуры внутренней стенки однопаливной и двухтопливной форсунок

с одинаковой массой и из одного и того же стального сплава с применением керосина ТС-1. Результаты расчета $T_{w\text{вн}}$ с применением формул (1), (6) представлены на рис. 4 и 5.

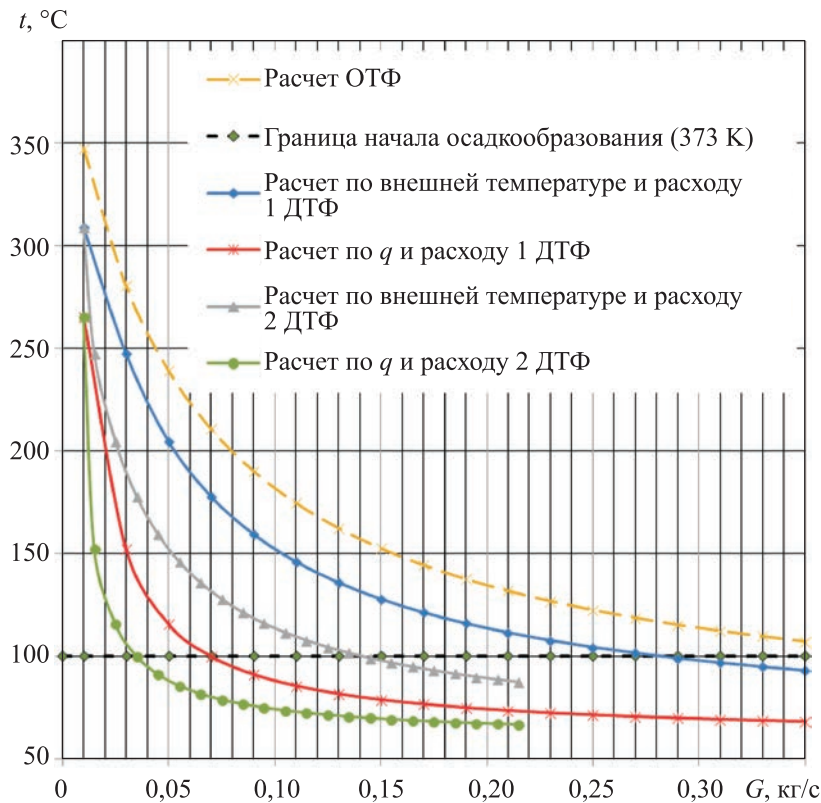


Рис. 4. Расчет температуры внутренней поверхности ОТФ и ДТФ (при расчете по плотности теплового потока $q = 0,5 \cdot 10^6$ Вт/м²)

Все каналы ДТФ идентичны по геометрии с каналом ОТФ: гидравлический диаметр $d_g = 0,01$ м, площадь внутренней поверхности одного канала $F_{вн} = 0,005$ м². При этом «сухая» масса форсунок составила всего $M_{\phi} = 0,25$ кг; $C_M = 500$ Дж/(кг · К) и $\lambda_{\phi} = 20$ Вт/(м · К) (для стального сплава); давление ТН $p = (0,1 \dots 1,0)$ МПа; температура внешней поверхности форсунки $T_{wн} = 673$ К; определяющая толщина стенки форсунки $l_{\phi} = 0,003$ м. Внутри ДТФ задавали разные массовые расходы ТС-1.

Температура всех ТН на входе в форсунку составила $T_{f0} = 293$ К. По средней (предполагаемой) температуре ТН внутри нагретой форсунки $T_{fm} = 333$ К (60 °С) выбраны удельная теплоемкость, плотность, коэффициент теплопроводности и коэффициент кинематической

вязкости в данном топливном канале. Расход керосина ТС-1 G_f варьировался в широком диапазоне, в зависимости от которого изменялся коэффициент теплоотдачи α . Рассчитаны числа Re , Pr .

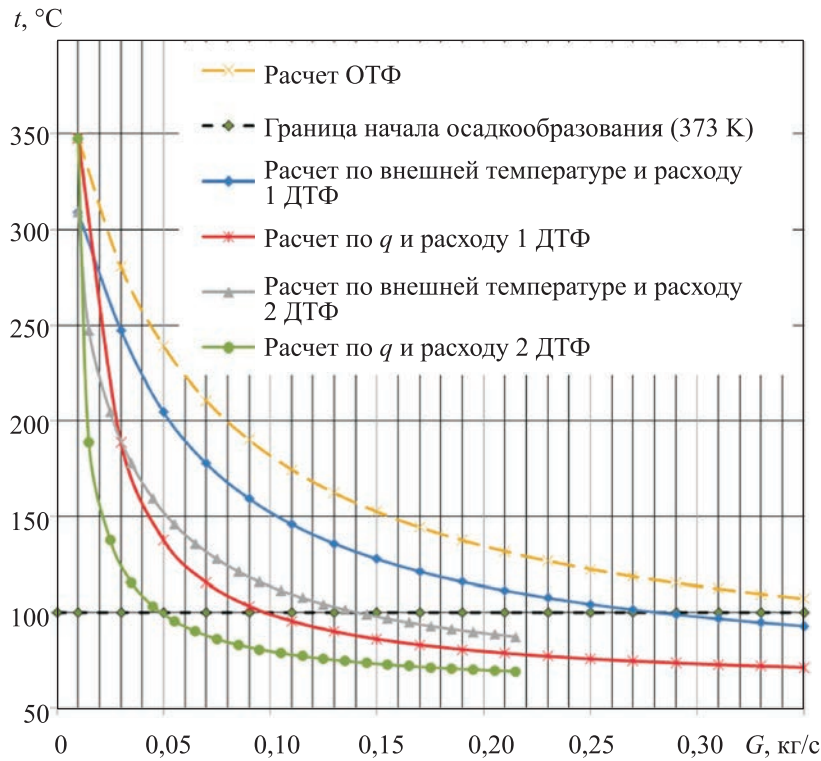


Рис. 5. Расчет температуры внутренней поверхности ОТФ и ДТФ (при расчете по плотности теплового потока $q = 0,7 \cdot 10^6$ Вт/м²)

По формулам теплообмена для переходного и турбулентного режимов рассчитаны числа Nu и коэффициенты теплоотдачи α_i внутри топливных каналов. Лучистый теплообмен не учитывался.

При расчетах образование углеродсодержащих осадков не учитывалось, хотя было вполне возможно применить ряд формул теплообмена, например, с критерием подобия осадкообразования [19]. При этом формулы (1), (2), (6), (7) не изменятся, так как изменятся значения коэффициентов теплоотдачи внутри этих выражений.

Расчет для ОТФ был проведен без применения q , т. е. по температуре внешней поверхности форсунки.

Как видно на рис. 4, 5, в случае $q = 0,7 \cdot 10^6$ Вт/м² результаты расчета по плотности теплового потока q по формуле (6) более близки к результатам расчета по температуре на поверхности форсунки $T_{вн}$ с помощью формулы (1).

Преимущества разработанной методики расчета заключаются в следующем.

1. Определение средней температуры стенки внутри корпуса форсунки без применения температуры на поверхности форсунки.

2. Оперативная диагностика форсунок ВРД для определения остаточного ресурса двигателя.

3. Нахождение неизвестных параметров путем построения кривых разными способами (при близком расположении кривых можно сделать вывод о точности измерений, например, на рис. 4 и 5 видно, что, скорее всего, плотность теплового потока равна $q = 0,7 \cdot 10^6$ Вт/м²).

4. Возможность учета осадкообразования внутри форсунки на стенках нагретых металлических каналов (например, увеличение площади, покрытой углеродсодержащим осадком, может способствовать снижению коэффициента теплоотдачи и, как следствие, повышению температуры на внутренней и внешней поверхностях форсунки).

5. Возможность применения методики для расчета практически любых мультитопливных форсунок независимо от условий эксплуатации, типа и назначения теплового двигателя.

Заключение. Разработана методика оперативного расчета температуры внутренней поверхности стенки мультитопливной форсунки по плотности теплового потока с целью поддержания работоспособности и предотвращения осадкообразования в каналах подачи жидкого УВГ. Данную методику можно эффективно применять при конструировании новых многотопливных форсунок, а также устройств подачи топлива с рубашкой охлаждения реактивных двигателей и энергоустановок наземного, аэрокосмического и космического базирования.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Большаков Г.Ф. *Физико-химические основы образования осадков в реактивных топливах*. Ленинград, Химия, 1972, 232 с.
- [2] Алтунин В.А. *Исследование особенностей теплоотдачи к углеводородным горючим и охладителям в энергетических установках многофазового использования. Книга первая*. Казань, Изд-во «Казанский государственный университет им. В.И. Ульянова-Ленина», 2005, 272 с.
- [3] Яновский Л.С., Иванов В.Ф., Галимов Ф.М., Сапгир Г.Б. *Коксоотложения в авиационных и ракетных двигателях*. Казань, Абак, 1999, 284 с.
- [4] Алтунин К.В. Пути совершенствования жидкостных форсунок ВРД. *Материалы Междунар. молодежной науч. конф., посвященной 120-летию со дня рождения авиаконструктора, акад. А.Н. Туполева «Туполевские чтения»*. Казань, Изд-во Каз. гос. техн. ун-та им. А.Н. Туполева, 2008, т. 1, с. 234–235.
- [5] Алтунин К.В. Разработка новой методики расчета толщины слоя углеродсодержащих осадков в топливных каналах тепловых двигателей и энергоустановок. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2021, вып. 10 (118). <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2021-10-2119>

- [6] Ramier S.A., Barve V.V., Thackway R.L., et. al. *Multi-functional fuel nozzle with a heat shield*. WO Patent 2016/024975. F23R 3/28, F23R 3/36, F23D 11/38. Published 18.02.2006.
- [7] Алтунин К.В. *Форсунка*. Патент РФ на изобретение № 2388966. МПК F23D 11/36, F23K 5/18. Бюл. № 13 от 10.05.2010.
- [8] Алтунин К.В. *Форсунка*. Патент РФ на изобретение № 2447362. МПК F23D11/36, F23K5/18. Бюл. № 10 от 10.04.2012.
- [9] Алтунин В.А., Алтунин К.В., Абдуллин М.Р., Львов М.Л., ЩигOLEV А.А., Платонов Е.Н., Юсупов А.А., Алиев И.Н., Яновский Л.С., Яновская М.Л. Некоторые пути совершенствования двигателей и энергоустановок марки «НК». Часть 1. *Тепловые процессы в технике*, 2021, т. 13, № 12, с. 530–542.
- [10] Алтунин В.А., Алтунин К.В., Абдуллин М.Р., Львов М.Л., ЩигOLEV А.А., Платонов Е.Н., Юсупов А.А., Алиев И.Н., Яновский Л.С., Яновская М.Л. Некоторые пути совершенствования двигателей и энергоустановок марки «НК». Часть II. *Тепловые процессы в технике*, 2022, т. 14, № 1, с. 9–21.
- [11] Алтунин В.А., Алтунин К.В., Алиев И.Н., Гортышов Ю.Ф., Давлатов Н.Б., Зарипова М.А. и др. *Некоторые пути повышения эффективности жидкостных реактивных двигателей летательных аппаратов на углеводородных и азотсодержащих горючих и охладителях*. Монография. Л.С. Яновский, ред. Казань, Изд-во «Школа», 2020, 148 с.
- [12] Малыгина М.В. Численное исследование многотопливного горелочного модуля камеры сгорания ГТУ. *Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета*, 2011, № 3 (27), с. 143–150.
- [13] Мурашев П.М. *Многотопливная форсунка для газотурбинных двигателей и установок*. Патент РФ на ПМ № 110818. МПК F23D11/10. Оpubл. 27.11.2011. Бюл. № 33.
- [14] Бурдыкин В.Д., Козлов В.Г., Кондрашова Е.В. *Многотопливная форсунка*. Патент РФ на ПМ № 166189. МПК F23D11/10, F23D11/36. Оpubл. 20.11.2016.
- [15] Мальчук В.И., Шатров М.Г., Кудряшов Б.А., Скорodelов С.Д. *Форсунка для подачи двух видов топлива в дизельный двигатель*. Патент РФ на ИЗ № 2541674. МПК F02M 43/04, F02D 19/06, F02M 21/00. Оpubл. 20.02.2015. Бюл. № 5.
- [16] Стасюк А.В., Калашник Н.Н., Приладышев Д.Ю., Пустарнаков А.И. *Форсунка двухтопливная «газ плюс жидкое топливо»*. Патент РФ на ИЗ № 2578785. МПК F23D 17/00, F23R 3/36. Оpubл. 27.03.2016. Бюл. № 9.
- [17] Алтунин К.В. Разработка методики расчета температуры внутренней стенки мультитопливной форсунки с целью предотвращения осадкообразования и перегрева. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2021, № 6 (735), с. 37–47.
- [18] Cengel Yunus A. *Heat Transfer: A Practical Approach*. 2nd edition. McGraw-Hill, 2002, 896 p.
- [19] Алтунин К.В. Разработка методики расчета теплоотдачи при влиянии осадкообразования и электрической конвекции в среде керосина. *Тепловые процессы в технике*, 2022, т. 14, № 7, с. 325–334.

Статья поступила в редакцию 05.12.2022

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Алтунин К.В. Разработка методики расчета температуры внутренней стенки мультитопливной форсунки с учетом плотности теплового потока. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2022, вып. 12.

<http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2022-12-2238>

Алтунин Константин Витальевич — канд. техн. наук, доцент кафедры ТиЭМ, КНИТУ им. А.Н. Туполева — КАИ. Область деятельности и научные интересы: теплообмен, теплоотдача в жидких и газообразных углеводородных горючих; разработка новых изобретений (полезных моделей) в сфере теплообмена, транспорта, спорта. e-mail: altkonst881@yandex.ru

Development of a method for temperature calculation of the multi-fuel nozzle inner wall based on heat flux

© K.V. Altunin

Tupolev Kazan National Research Technical University — KAI,
Kazan, 420111, Russia

The article presents results of development of a new method for temperature calculation of the multi-fuel nozzle inner wall based on data on heat flux. A patent search and an analysis of scientific and technical information on the multi-fuel nozzles were carried out. It was established that one of the most effective ways to prevent appearance and rapid formation of carbonaceous deposits in liquid hydrocarbon fuels was to reduce temperature of the metal wall. New formulae were obtained to calculate the inner surface temperature depending on the amount of heat-transfer agents and their thermophysical properties, geometric characteristics of the supply channels and the injector “dry” mass. A comparative theoretical calculation of the temperature decrease inside a single-fuel and a dual-fuel nozzles was carried out at different mass flow rates of kerosene. The results obtained indicate higher cooling efficiency of multi-fuel nozzles compared to the single-fuel ones..

Keywords: multi-fuel nozzle, inner wall temperature, heat-transfer agent, hydrocarbon fuel

REFERENCES

- [1] Bol'shakov G.F. *Fiziko-khimicheskie osnovy obrazovaniya osadkov v reaktivnykh toplivakh* [Physico-chemical basis for deposits' formation in the jet fuels]. Leningrad, Khimiya Publ., 1972, 232 p.
- [2] Altunin V.A. *Issledovanie osobennostey teplootdachi k uglevodorodnym goryuchim i okhladitelyam v energeticheskikh ustanovkakh mnogorazovogo ispolzovaniya* [Study of the features of heat transfer to hydrocarbon fuels and coolants in reusable power plants]. *Book one*. Kazan, KFU Publ., 2005, 272 p.
- [3] Yanovskij L.S., Ivanov V.F., Galimov F.M., Sapgir G.B. *Koksootlozheniya v aviatsionnykh i raketnykh dvigatelyakh* [Coke deposits in aviation and rocket engines]. Kazan, Abak Publ., 1999, 284 p.
- [4] Altunin K.V. Puti usovershenstvovaniya zhidkostnykh forsunok VRD [Ways to improve the ABE liquid injectors]. In: *Materialy Mezhdunar. molodezhnoy nauchn. konf., posvyasch. 120-letiyu so dnya rozhdeniya aviakonstruktora, akad. A.N. Tupoleva «Tupolevskie chteniya»* [Materials of the Int. youth scientific conf. devoted to the 120th anniversary of Academician A.N. Tupolev birthday “Tupolev Readings”]. Kazan, Tupolev Kazan State Technical University Publ., 2008, vol. 1, pp. 234–235.
- [5] Altunin K.V. Razrabotka novoy metodiki rascheta tolschiny sloya uglerod-soderzhaschikh osadkov v toplivnykh kanalakh teplovykh dvigateley i energoustanovok [Elaboration of a new calculation procedure of hydrocarbon deposit layer thickness in fuel channels of heat engines and power plants]. *Inzhenerny zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2021, iss. 10 (118). <https://doi.org/10.18698/2308-6033-2021-10-2119>
- [6] Ramier S. A., Barve V.V., Thackway R.L., et.al. *Multi-functional fuel nozzle with a heat shield*. WO Patent 2016/024975. F23R 3/28, F23R 3/36, F23D 11/38. 18.02.2006.

- [7] Altunin K.V. *Forsunka* [Nozzle]. Patent RF on invention no. 2388966. IPC F23D 11/36, F23K 5/18. Bull. no. 13. Publ. May 10, 2010.
- [8] Altunin K.V. *Forsunka* [Nozzle]. Patent RF on invention no. 2447362. IPC F23D11/36, F23K5/18. Bull. no. 10. Publ. April 10, 2012.
- [9] Altunin V.A., Altunin K.V., Abdullin M.R., L'vov M.L., Schigolev A.A., Platonov E.N., Yusupov A.A., Aliev I.N., Yanovskij L.S., Yanovskaya M.L. Nekotorye puti sovershenstvovaniya dvigateley i energoustanovok marki «NK». Chast' I [Certain ways to improve engines and power plants of the “NK” mark]. *Teplovye protsessy v tekhnike — Thermal Processes in Engineering*, 2021, vol. 13, no. 12, pp. 530–542.
- [10] Altunin V.A., Altunin K.V., Abdullin M.R., L'vov M.L., Shchigolev A.A., Platonov E.N., Yusupov A.A., Aliev I.N., Yanovskij L.S., Yanovskaya M.L. Nekotorye puti sovershenstvovaniya dvigateley i energoustanovok marki «NK». Chast' II. [Certain ways to improve engines and power plants of the “NK” mark]. *Teplovye protsessy v tekhnike — Thermal Processes in Engineering*, 2022, vol. 14, no. 1, pp. 9–21.
- [11] Altunin V.A., Altunin K.V., Aliev I.N., Gortyshov Yu.F., Davlatov N.B., Zaripova M.A., Kernozhickiy V.A., Kolychev A.V., Raznoschikov V.V., Safarov M.M., Yanovskij L.S., Yanovskaya M.L. *Nekotorye puti povysheniya effektivnosti zhidkostnykh reaktivnykh dvigateley letatelnykh apparatov na uglevodородородnykh i azotosoderzhashchikh goryuchikh i okhladitelyakh* [Certain ways to improve efficiency of the aircraft jet engines on hydrocarbon and nitrogenized fuels and coolants]. Monography. L.S. Yanovskij, ed. Kazan, Shkola Publ., 2020, 148 p.
- [12] Malygina M.V. Chislennoe issledovanie mnogotoplivnogo gorelochnogo modulya kamery sgoraniya GTU. [Numerical investigation multifuel combustion gas turbine combustion chamber module]. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta — Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*, 2011, no. 3 (27), pp. 143–150.
- [13] Murashev P.M. *Mnogotoplivnaya forsunka dlya gazoturbinnnykh dvigateley i ustanovok* [Multifuel nozzle for gas turbine engines and plants]. Patent RF on PM no. 110818. IPC F23D11/10. Bull. no. 33. Publ. November 27, 2011.
- [14] Burdykin V.D., Kozlov V.G., Kondrashova E.V. *Mnogotoplivnaya forsunka* [Multifuel nozzle]. Patent RF on PM no.166189. IPC F23D11/10, F23D11/36. Publ. November 20, 2016.
- [15] Mal'chuk V.I., Shatrov M.G., Kudryashov B.A., Skorodelov S.D. *Forsunka dlya podachi dvukh vidov topliva v dizelny dvigatel* [Nozzle for fuel supply of two fuels in a diesel engine]. Patent RF on IZ no. 2541674. IPC F02M 43/04, F02D 19/06, F02M 21/00. Bull. no. 5. Publ. February 20, 2015.
- [16] Stasyuk A.V., Kalashnik N.N., Priladyshev D.YU., Pustarnakov A.I. *Forsunka dvukhtoplivnaya “gaz plyus zhidkoe toplivo”* [Two-fuel nozzle “gas plus liquid fuel”]. Patent RU on IZ no. 2578785. IPC F23D 17/00, F23R 3/36. Publ. March 27, 2016. Bull. no. 9.
- [17] Altunin K.V. Razrabotka metodiki rascheta temperatury vnutrenney stenki multitoplivnoy forsunki s celiyu predotvrascheniya osadkoobrazovaniya i peregreva. [Development of a technique for calculating the temperature of the multi-fuel nozzle inner wall in order to prevent deposit formation and overheating]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroyeniye — BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2021, no. 6 (735), pp. 37–47.
- [18] Cengel Yunus A. *Heat Transfer: A Practical Approach*. Second edition. Mcgraw-Hill Publ., 2002, 896 p.

- [19] Altunin K.V. Razrabotka metodiki rascheta teplootdachi pri vliyarii osadkoobrazovaniya i elektricheskoy konveksii v srede kerosina [Development of calculation methods of heat transfer under influence of deposit formation and electric convection in a medium of kerosine]. *Teplovye protsessy v tekhnike — Thermal Processes in Engineering*, 2022, vol. 14, no. 7, pp. 325–334.

Altunin K.V., Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Thermal Technology and Power Engineering, Tupolev Kazan National Research Technical University. Scientific activity and interests: heat exchange, heat transfer in liquid and gaseous hydrocarbon fuels, development of new inventions (useful models) in heat exchange, transport and sports. e-mail: altkonst881@yandex.ru