

## Разработка методики расчета перепада давления на топливном фильтре из-за появления углеродсодержащих осадков в среде жидкого углеводородного горючего (охладителя)

© К.В. Алтунин

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

*Представлено теоретическое исследование, связанное с разработкой новой методики расчета перепада давления на топливном фильтре из-за осадкообразования в среде жидкого углеводородного горючего (охладителя). Приведены некоторые теплофизические свойства осадков в топливных системах разных тепловых двигателей. Рассмотрены изобретения, направленные на предотвращение выхода из строя фильтров и перепада давления в них. Поскольку в результате обзора и анализа научно-технической литературы не обнаружены методики расчета перепада давления на фильтрах тепловых двигателей и энергоустановок с учетом тепловой и электрической природы углеродсодержащих отложений, была разработана новая формула расчета перепада давления на топливном фильтре вследствие осадкообразования. На базе этой формулы создана новая методика расчета изменения давления, которая также может быть использована для расчета остаточного ресурса фильтроэлементов. Проведена теоретическая апробация новой методики на основе результатов экспериментальных исследований предыдущих авторов с применением авиационного керосина, в ходе которой получено значение наработки до отказа топливного фильтра на нескольких режимах работы. Универсальность предложенной методики заключается в том, что она применима для расчета перепада давления практически во всех тепловых двигателях и энергоустановках наземного, воздушного и аэрокосмического базирования при различных условиях эксплуатации топливной системы. Кроме того, ее можно использовать при различных материалах металлических стенок фильтроэлементов, скоростях прокачки углеводородного горючего (охладителя), давлениях на входе в топливные фильтры, температурных режимах внутри топливно-подающих и охлаждающих каналов двигателей и энергоустановок.*

**Ключевые слова:** температура, перепад давления, осадкообразование, углеродсодержащий осадок, жидкие углеводородные горючие и охлаждающие, удельное электрическое сопротивление

**Введение.** Термин «осадкообразование» появился во второй половине XX в. в связи с интенсивным применением реактивных топлив, впервые он встречается, например, в книге Я.Б. Черткова [1]. Процесс осадкообразования в жидких углеводородных горючих (УВГ) и охлаждающих (УВО) в большинстве случаев оказывает негативное влияние на работу тепловых двигателей и энергоустановок (ЭУ) наземного, воздушного, аэрокосмического и космического базирования. Например, в США только для обычного нефтеперерабатывающе-

го завода ежегодные затраты составляют до 10 млн долл. [2]. Аналогичные проблемы отмечаются в теплоэнергетике, ракетостроении и авиации [3].

Осадкообразованию подвержены стенки теплообменных аппаратов, контактирующие с жидким УВО, многие элементы топливно-подающих систем ЭУ, тепловых двигателей на жидких УВГ, в том числе газотурбинных (ГТД), где углеродсодержащие осадки могут появляться на стенках нагретых каналов, внутри форсунок и их распылителей, а также на топливных фильтрах. До сих пор проблема осадкообразования полностью не решена, что требуется принимать во внимание при создании новых видов (типов) реактивных топлив.

Появление осадков на фильтроэлементах неизбежно приводит к перепаду давления, что может свидетельствовать об остаточном ресурсе или о выходе из строя топливных фильтров. Особенно опасно осадкообразование на металлических фильтрах форсунок ГТД, установленных на различных летательных аппаратах, которое может приводить к снижению тяги двигателя во время полета воздушного или аэрокосмического судна [4–6]. Если датчики давления установлены до и после топливных фильтров, то несложно с некоторой погрешностью определить их остаточный ресурс, однако теоретически рассчитать точное время работы фильтров довольно трудно.

Цель работы — разработка новой методики расчета перепада давления на топливном фильтре ввиду появления углеродсодержащих осадков в среде жидкого углеводородного горючего (охладителя).

**Углеродсодержащий осадок в топливных системах.** Исследования в области процессов осадкообразования выявили их основную закономерность: в жидких УВГ (УВО) осадки появляются вследствие повышения температуры их нагрева [7, 8]. Причем с увеличением температуры также интенсифицируется коррозия металлов [1, 9].

Влияние температуры на размеры частиц осадка приведено в табл. 1. Для каждого жидкого УВГ (УВО) существует температура максимального осадкообразования: для Т-2 — 135 °С, для ТС-1 — 150 °С, для Т-1 — 160 °С, для Т-5 — 180 °С. Следует отметить, что осадкообразование зависит от материала стенки, температуры нагретой стенки, времени наработки и многих других факторов [7, 10].

Некоторые зарубежные исследователи [11] измеряли толщину углеродсодержащих отложений в разных областях камеры сгорания ДВС и вычисляли их средние значения, составившие 155...240 мкм. В работе [12] получены значения таких теплофизических величин осадка, как плотность  $\gamma = 1100...2000 \text{ кг/м}^3$ ; удельная изобарная теплоемкость  $C_p = 0,84...1,84 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$ ; теплопроводность  $\lambda = 0,17...0,8 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ ; коэффициент температуропроводности  $a = 3,5 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$ .

**Влияние температуры на размеры частиц осадка  
в некоторых реактивных горючих**

Марка УВГ	Температура, °С	Общее количество осадка, м <sup>2</sup> /100 мл	Распределение на фильтрах осадка, %, толщиной, мк			
			1-2	30	60	120
ГФ	140	1,2	79,6	1,8	1,0	0
	160	1,6	75,0	3,4	2,0	1,0
	180	1,7	66,9	2,8	1,0	0
	220	1,1	47,3	8,6	4,4	2,2
Т-7	150	1,0	80,0	1,0	0,5	0
	160	1,3	71,3	1,8	1,1	0
	200	1,1	61,0	4,0	2,0	0

Плотность сплошных отложений, образующихся вследствие окисления топлив при течении на каталитически неактивных поверхностях, практически постоянна:  $\gamma = 1010 \pm 50 \text{ кг/м}^3$  [8]. В некоторых случаях [10] для расчета принимают плотность сухого кокса  $\gamma_{\text{сух}}$  равной  $1000 \text{ кг/м}^3$ .

Установлено, что окисление реактивных топлив катализируется конструкционными материалами. По скорости окисления их можно расположить в следующем порядке:

чистые металлы —  $\text{Pb} > \text{Cu} > \text{Sn} > \text{Cr} > \text{Fe} > \text{Al}$ ;

стали —  $12\text{X}18\text{H}9\text{T} > 12\text{X}13 > 13\text{XПН}2\text{В}2\text{МФШ}$ ;

сплавы —  $\text{BrOC}10-10 > \text{ЛС}59-1, \text{BrAЖH}10-4-4 > \text{BrAЖMц}10-3-1,5 > > \text{BБ}24 > \text{Л}62$ .

Ингибирующее действие на окисление реактивных топлив оказывают такие металлы:  $\text{V} > \text{Mo} > \text{Mg} > \text{W} > \text{Ni} > \text{Nb} > \text{Zn}$  [13, 14].

Данные по образованию осадков в статических условиях при влиянии температуры представлены в табл. 2 [13].

Определение технического состояния фильтра на основе перепада давления на фильтре описано в патентах на изобретения [5, 15–17].

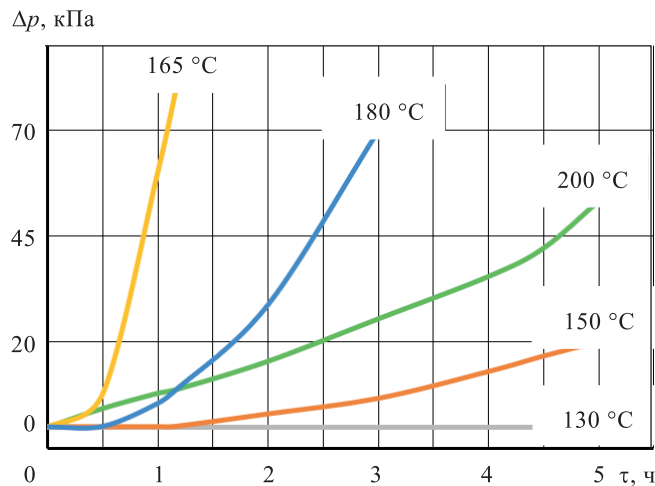
Динамика забивки контрольных фильтров при прокачке различных топлив в зависимости от температуры приведена на рис. 1, 2 [13]. Перепад давления на топливном фильтре свидетельствует об осадкообразовании. Можно провести полномасштабные эксперименты по замеру толщины углеродсодержащих осадков на металлических сетках фильтров, по определению химического состава таких отложений и т. д. Однако в отличие от стенки топливного канала, по которому реактивное УВГ подается к форсункам, в данном случае осадки откладываются сразу с двух сторон, причем, как правило, такие отложения имеют неравномерный диапазон распространения, разную толщину

на разных участках, неодинаковую пористость и др. Формулы расчета только толщины слоя осадка не подходят для точного определения степени закоксованности фильтров, в связи с чем необходимо разрабатывать новые методики расчета интенсивности осадкообразования на фильтрах ЭУ, ГТД и других тепловых двигателей.

Таблица 2

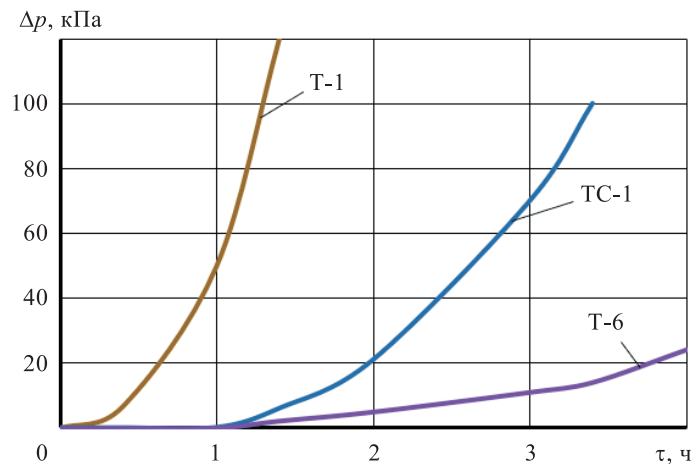
**Фракционный состав осадка, образующегося в топливе при нагревании в статических условиях**

Температура топлива, °С	Масса осадка на стеклянном фильтре, мг/100 мл	Отношение масс осадка на металлических ситах к осадку на стеклянном фильтре, %, для ячеек сит размером, мкм			
		15	30	50	120
<i>Топливо ТС-1</i>					
120	3,4	24,6	2,9	0	0
150	6,9	63	48	34	8
200	1,0	100	100	44	15
250	1,0	100	100	60	30
<i>Топливо Т-1</i>					
120	5,2	24	2,3	0	0
150	7,5	74	47	30	13
200	2,0	100	100	47	15
250	2,0	100	100	53	18



**Рис. 1.** Перепад давления на  $\Delta p$  на фильтре саржевого плетения ( $d = 16$  мкм) в зависимости от длительности прокачки  $\tau$  на установке типа ДТС-1 топлива Т-1 при различных температурах:

— 403 К; — 423 К; — 473 К; — 438 К; — 453 К



**Рис. 2.** Перепад давления на  $\Delta p$  на фильтре саржевого плетения ( $d = 16$  мкм) в зависимости от длительности прокачки  $\tau$  на установке типа ДТС-1 топлива Т-1, ТС-1, Т-6 при температуре  $165^\circ\text{C}$

**Разработка новой методики расчета перепада давления на топливном фильтре из-за осадкообразования.** В 1972 г. отечественный ученый Г.Ф. Большаков впервые выдвинул идею электрической природы осадкообразования, а также объяснил многие физико-химические основы этого процесса. Однако до сих пор не существует единой теории осадкообразования термоэлектрической природы. Процесс осадкообразования, согласно гипотезе Г.Ф. Большакова [18], имеет электрический характер: при температуре  $313\text{K}$  в жидких УВГ и УВО появляются заряженные частички (жидкость становится электропроводящей средой), а при дальнейшем нагреве до  $373\text{K}$  и более появляются диполи, которые притягиваются к противоположным зарядам на микронеровностях любой (даже полированной) поверхности (согласно теории Шоттки и Френкеля) и способствуют началу осадкообразования [7].

Автором статьи разработана обобщенная формула осадкообразования для  $n$  режимов эксплуатации тепловых двигателей, ЭУ одно- и многоразового использования на жидких УВГ и УВО. В данном случае режимом ( $i = 1, 2, 3, \dots, n$ ) следует считать новое состояние, отличное от предыдущего по одному из физических параметров, за исключением времени и температуры [19–22]:

$$\sum_{i=1}^n \delta_{\text{oc}_i} = \sum_{i=1}^n K_{\text{oc}_i} (\ln p_{\text{oc}_{\text{max}}} - \ln p_{\text{oc}_{i-1}}) \tau_i T_{w_i}, \quad (1)$$

где  $\delta_{\text{oc}_i}$  — толщина  $i$ -го слоя осадка, м;  $K_{\text{oc}_i}$  — эмпирический коэффициент, характеризующий условия  $i$ -го режима,  $(\text{Ом} \cdot \text{с} \cdot \text{К})^{-1}$ ;

$\rho_{oc_{max}}$  — максимальное значение удельного электрического сопротивления конечного слоя осадка, Ом·м;  $\rho_{oc_{i-1}}$  — значение удельного электрического сопротивления на поверхности предыдущего слоя осадка, Ом·м;  $\tau_i$  — время наработки  $i$ -го режима, с;  $T_{w_i}$  — температура стенки при  $i$ -м режиме, К.

Разработана также методика нахождения  $K_{oc}$ , (Ом·с·К)<sup>-1</sup>:

$$K_{oc_i} = \left( \frac{\delta_{oc1}}{(\ln \rho_{oc_{max}} - \ln \rho_w) \tau_1 T_{w1}} \right)_i, \quad (2)$$

где  $\delta_{oc1}$  — первоначальная толщина слоя осадка на металлической стенке топливно-охлаждающего канала, м;  $\rho_{oc_{max}}$  — максимальное значение удельного электрического сопротивления конечного слоя осадка, Ом·м;  $\rho_w$  — значение удельного электрического сопротивления материала стенки топливно-охлаждающего канала без осадка при температуре  $T_{w1}$ , Ом·м;  $\tau_1$  — время образования первоначального слоя осадка, с;  $T_{w1}$  — температура стенки топливно-охлаждающего канала, при которой образовался первоначальный слой осадка, К.

Для того чтобы эффективно прогнозировать осадкообразование на фильтре, необходимо экспериментально найти эмпирические коэффициенты  $K_{oc}$ , характеризующие условия работы на каждом режиме и зависящие от многих факторов:

$$K_{oc} = f(T_w; T_f; p; W; M; P; K_{шер}; K_{O_2}; K_{инн}; X; N; \tau; T; d \text{ и др.}), \quad (3)$$

где  $T_w$  — температура стенки фильтра;  $T_f$  — температура жидкого УВГ, УВО;  $p$  — давление в топливной системе;  $W$  — скорость прокачки УВГ (УВО);  $M$  — материал стенки фильтра;  $P$  — присадки к топливу;  $K_{шер}$  — степень шероховатости поверхности;  $K_{O_2}$  — насыщенность кислородом;  $K_{инн}$  — насыщенность инертными газами;  $X$  — вид УВГ (УВО), его физико-химические и физико-технические характеристики и свойства;  $N$  — число циклов работы двигателя, ГТД, ЭУ;  $\tau$  — время наработки фильтра;  $T$  — тип фильтра, его геометрические параметры;  $d$  — диаметр отверстий фильтра.

Удельное электрическое сопротивление многих металлов возрастает с повышением температуры. Например, для стали 12Х18Н9Т  $\rho = 72,3 \cdot 10^{-8}$  Ом·м при 20 °С,  $\rho = 79,2 \cdot 10^{-8}$  Ом·м при 100 °С,  $\rho = 109,2 \cdot 10^{-8}$  Ом·м при 700 °С [23]). Удельное электрическое сопротивление слоя углеродсодержащего осадка можно определить не только экспериментально, но и теоретически, зная, в частности, пористость осадка  $\Pi$  [22]:

$$\rho_{oc} = \Pi \rho_{m,w} + (1 - \Pi) \rho_{сух}, \quad (4)$$

где  $\rho_{m,w}$  — удельное электрическое сопротивление жидкого УВГ (УВО) при средней температуре кокса, Ом·м;  $\rho_{сух}$  — удельное электрическое сопротивление сухого кокса, Ом·м.

Проведен расчет  $\rho_{oc}$  по формуле (4) при средней температуре слоя осадка  $T_{мос}$ ,  $\rho_{сух}$  взято из [24, 25],  $\rho_{m,w}$  подсчитано на основе данных, взятых из разных источников при начальном значении  $\rho_{m,w} = 0,58 \cdot 10^{10}$  Ом·м,  $\Pi = (0,1-0,5)$  (табл. 3) [22].

На основе данных табл. 3 построен график зависимости удельного электрического сопротивления слоя углеродсодержащего осадка из ТС-1 от средней температуры при различной пористости (рис. 3).

Следует отметить, что экспериментальный и теоретический расчет, например по формуле (1), толщины слоя углеродсодержащих осадков на поверхности непроницаемой стенки топливного канала неприменим для расчетов на поверхности фильтроэлементов: слои осадков могут быть разные по высоте, пористости и другим параметрам, может наблюдаться локальное осадкообразование, фильтр может продолжать работать при частичном засорении и т.д.

В связи с этим разработана новая формула расчета возможного перепада давления на топливном фильтре:

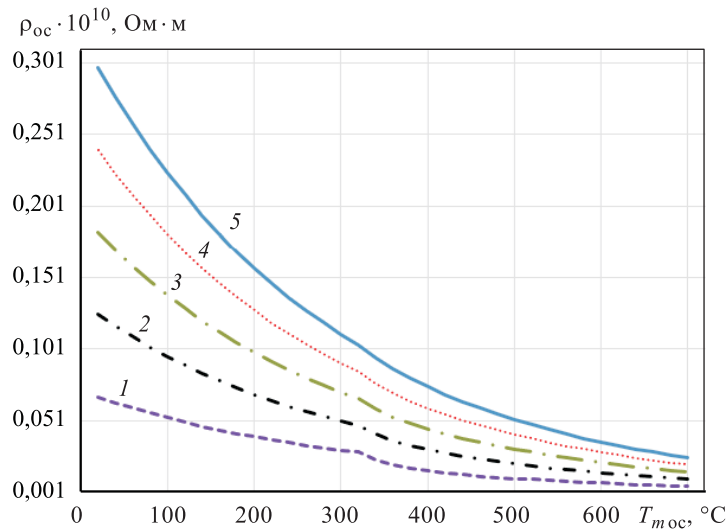
$$\sum_{i=1}^n \Delta p_{\phi_i} = \sum_{i=1}^n K_{oc\Delta p_i} (\ln \rho_{oc_{max}} - \ln \rho_{oc_{i-1}}) \tau_i T_{w_i}, \quad (5)$$

где  $\Delta p_{\phi_i}$  — перепад давления на фильтре при  $i$ -м режиме, Па;  $K_{oc\Delta p_i}$  — эмпирический коэффициент, характеризующий условия  $i$ -го

Таблица 3

**Влияние температуры и пористости на удельное электрическое сопротивление углеродсодержащего осадка из керосина ТС-1**

$t, ^\circ\text{C}$	$\rho_{oc}, \text{ Ом}\cdot\text{м}$ при различных значениях $\Pi$					$T, \text{ К}$
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	
20	$0,067 \cdot 10^{10}$	$0,125 \cdot 10^{10}$	$0,182 \cdot 10^{10}$	$0,24 \cdot 10^{10}$	$0,297 \cdot 10^{10}$	293
100	$0,053 \cdot 10^{10}$	$0,095 \cdot 10^{10}$	$0,138 \cdot 10^{10}$	$0,181 \cdot 10^{10}$	$0,224 \cdot 10^{10}$	373
200	$0,039 \cdot 10^{10}$	$0,069 \cdot 10^{10}$	$0,098 \cdot 10^{10}$	$0,128 \cdot 10^{10}$	$0,157 \cdot 10^{10}$	473
300	$0,03 \cdot 10^{10}$	$0,05 \cdot 10^{10}$	$0,071 \cdot 10^{10}$	$0,091 \cdot 10^{10}$	$0,111 \cdot 10^{10}$	573
400	$0,016 \cdot 10^{10}$	$0,03 \cdot 10^{10}$	$0,045 \cdot 10^{10}$	$0,06 \cdot 10^{10}$	$0,074 \cdot 10^{10}$	673
500	$0,01 \cdot 10^{10}$	$0,021 \cdot 10^{10}$	$0,031 \cdot 10^{10}$	$0,041 \cdot 10^{10}$	$0,051 \cdot 10^{10}$	773
600	$0,007 \cdot 10^{10}$	$0,014 \cdot 10^{10}$	$0,021 \cdot 10^{10}$	$0,029 \cdot 10^{10}$	$0,036 \cdot 10^{10}$	873
700	$0,005 \cdot 10^{10}$	$0,01 \cdot 10^{10}$	$0,015 \cdot 10^{10}$	$0,02 \cdot 10^{10}$	$0,025 \cdot 10^{10}$	973



**Рис. 3.** Зависимость удельного электрического сопротивления слоя углеродсодержащего осадка  $\rho_{oc}$  из ТС-1 от средней температуры  $T_{m_{oc}}$  при разной пористости осадка:  $\Pi = 0,1$  (1);  $\Pi = 0,2$  (2);  $\Pi = 0,3$  (3);  $\Pi = 0,4$  (4);  $\Pi = 0,5$  (5)

режима,  $\frac{\text{Па}}{\text{Ом} \cdot \text{м} \cdot \text{с} \cdot \text{К}}$ ;  $\rho_{oc_{max}}$  — максимальное значение удельного электрического сопротивления конечного слоя осадка, Ом·м;  $\rho_{oc_{i-1}}$  — значение удельного электрического сопротивления на поверхности предыдущего слоя осадка, Ом·м;  $\tau_i$  — время наработки  $i$ -го режима, с;  $T_{w_i}$  — температура стенки фильтра при  $i$ -м режиме, К.

Разработанная методика расчета перепада давления на топливном фильтре вследствие появления углеродсодержащих осадков в среде жидкого углеводородного горючего основана на следующем алгоритме:

1) определяются (или задаются) количество и тип режимов работы топливного фильтра со всеми основными параметрами, включая скорость прокачки УВГ (УВО), давление в топливной системе (на входе в фильтр), вид УВГ (УВО) и наличие присадок, геометрические характеристики, степень шероховатости поверхности и материал фильтра (фильтроэлемента) и другие параметры (см. (3));

2) из готовых таблиц выбираются значения эмпирических коэффициентов режимов  $K_{oc_{\Delta p_i}}$  с учетом скорости прокачки жидкого УВГ (УВО) в топливном канале, где расположен фильтр, вида УВГ (УВО), наличия присадок в УВГ (УВО), материала стенки фильтра и т. п.;

3) задаются температуры поверхности фильтра (фильтроэлемента)  $T_{w_i}$  и жидкого УВГ (УВО) на входе в фильтр  $T_{УВГ_i}$ ;



4) задаются временные интервалы работы фильтра;

5) по формуле (5) рассчитывается общий перепад давления на фильтре, при подсчете первого слоя (за минимальное время) учитывается удельное электрическое сопротивление металлической стенки  $\rho_w$ , а в других случаях —  $\rho_{oc}$  в зависимости от средней температуры слоя осадка (см. рис. 3).

**Теоретический расчет перепада давления на топливном фильтре из-за осадкообразования по новой методике.** Проведен теоретический расчет перепада давления на топливном фильтре вследствие появления углеродсодержащих осадков. В качестве примера были взяты два режима, параметры которых приведены в табл. 4.

Таблица 4

Параметры режимов работы топливного фильтра

Параметры режима	Режим I	Режим II	Единица измерения
$K_{oc\Delta p_i}$	$3,05 \cdot 10^{-5}$	$1,37 \cdot 10^{-4}$	$\frac{\text{Па}}{\text{Ом} \cdot \text{м} \cdot \text{с} \cdot \text{К}}$
$T_{w_i}$	423	473	К
$T_{УВГ_i}$	293	293	К
$\rho_{oc\max}$	$0,3 \cdot 10^{10}$	$0,3 \cdot 10^{10}$	Ом·м
$\rho_w$	$85,2 \cdot 10^{-8}$	$86,1 \cdot 10^{-8}$	Ом·м
$\tau_i$	3600	7200	с
Материал стенки	12X18H9T	12X18H9T	—
УВГ	T-1	T-1	—

В ходе исследования были приняты следующие допущения: фильтр не перегревается, пористость осадков одинакова, температура жидкого УВГ (УВО) постоянна и равна 293К. В результате теоретического расчета на основе формулы (5) и значений, взятых на рис. 1, получено, что полный перепад давления на топливном фильтре  $\Delta p_\phi$  за общее время 3 ч составил 8514 Па.

**Теоретический расчет остаточного ресурса топливного фильтра из-за осадкообразования.** Предложенная выше методика расчета возможного перепада давления на фильтре может быть использована и для прогнозирования остаточного ресурса фильтра. Например, в случае трех режимов формулу (5) можно записать следующим образом:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^3 \Delta p_{\phi_i} &= \sum_{i=1}^3 K_{oc\Delta p_i} (\ln \rho_{oc_{max}} - \ln \rho_{oc_{i-1}}) \tau_i T_{w_i} = \\ &= K_{oc\Delta p_1} (\ln \rho_{oc_{max}} - \ln \rho_w) \tau_1 T_{w_1} + K_{oc\Delta p_2} (\ln \rho_{oc_{max}} - \ln \rho_{oc_1}) \tau_2 T_{w_2} + \\ &\quad + K_{oc\Delta p_3} (\ln \rho_{oc_{max}} - \ln \rho_{oc_2}) \tau_3 T_{w_3}. \end{aligned} \quad (6)$$

Представим, что необходимо найти наработку до отказа одного топливного фильтра в течение трех режимов работы. Пусть первые два режима идентичны вышеуказанным (см. табл. 4). Зададим максимальный перепад давления на фильтре в системе топливоподачи ГТД

$$\Delta p_{\phi_{max}} = \sum_{i=1}^3 \Delta p_{\phi_i} = 0,15 \text{ МПа,}$$

перепад давления в конце второго режима возьмем из предыдущего примера — 8514 Па. Тогда, зная температуру металлической стенки фильтра в течение 3-го режима (например  $T_{w_3} = 423\text{К}$ ), можно рассчитать время 3-го режима по формуле

$$\tau_3 = \frac{\sum_{i=1}^3 \Delta p_{\phi_i} - \Delta p_{\phi_1} - \Delta p_{\phi_2}}{K_{oc\Delta p_3} (\ln \rho_{oc_{max}} - \ln \rho_{oc_2}) T_{w_3}}. \quad (7)$$

По формуле (7) при  $K_{oc\Delta p_3} = 3,05 \cdot 10^{-5} \text{ Па}/(\text{Ом} \cdot \text{м} \cdot \text{с} \cdot \text{К})$  получено, что  $\tau_3 = 20,68 \text{ ч}$ . Тогда наработка до отказа данного фильтра равна 23,68 ч.

**Заключение.** Таким образом, разработана новая методика расчета перепада давления на топливном фильтре вследствие появления углеродсодержащих осадков в среде жидкого углеводородного горючего (охладителя) на основе новой формулы, учитывающей тепловую и электрическую природу осадкообразования. Проведена теоретическая апробация данной методики с нахождением новых коэффициентов режимов, полного перепада давления на фильтре, а также с определением остаточного ресурса фильтра. В дальнейшем возможно создание баз данных со всеми коэффициентами режимов эксплуатации топливно-подающих и охлаждающих каналов тепловых двигателей и ЭУ. Эффективный прогноз дальнейшего перепада давления на фильтрах и их остаточного ресурса будет способствовать улучшению мониторинга работы систем подачи УВГ (УВО) при отказе каких-либо датчиков контроля, например, датчика давления. Учет тепловой и электрической природы углеродсодержащих осадков позволяет более точно рассчитать не только толщину углеродсодержащих отложений на нагретых стенках каналов, но и наработку до отказа тепловых фильтров самых разных геометрических параметров и материалов.

Намечены пути дальнейших экспериментальных и теоретических исследований.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Чертков Я.Б. *Современные и перспективные углеводородные реактивные и дизельные топлива*. Москва, Химия, 1968, 356 с.
- [2] Van Nostrand W.Z., Leach S.H., Haluske J. *Economic Penalty Associated with the Fouling of Refinery Heat Transfer Equipment*. Washington, 1981, pp. 619–643.
- [3] Алтунин В.А., Алтунин К.В., Дресвянников Ф.Н. и др. Проблемы внутрикамерных тепловых процессов в авиационных, аэрокосмических и космических энергоустановках многократного использования. *Сб. тез. докл. Междунар. науч. семинара «Проблемы моделирования и динамики сложных междисциплинарных систем»*. Казань, Изд-во Каз. гос. техн. ун-та им. А.Н. Туполева, 2010, с. 12.
- [4] Алтунин К.В. Форсунка. *Патент РФ на изобретение № 2388966*. Бюл. № 13 от 10.05.2010, 8 с.
- [5] Алтунин К.В. Форсунка. *Патент РФ на изобретение № 2447362*. Бюл. № 10 от 10 апреля 2012 г.
- [6] Алтунин К.В. Функционально-стоимостной анализ горелочных устройств и форсунок: монография. Казань, Изд-во КНИТУ-КАИ, 2020, 156 с.
- [7] Алтунин В.А. *Исследование особенностей теплоотдачи к углеводородным горючим и охладителям в энергетических установках многократного использования. Книга первая*. Казань, Изд-во «Казанский государственный университет им. В.И. Ульянова-Ленина», 2005, 272 с.
- [8] Яновский Л.С., Иванов В.Ф., Галимов Ф.М., Сапгир Г.Б. *Коксоотложения в авиационных и ракетных двигателях*. Казань, Абак, 1999, 284 с.
- [9] Алтунин В.А., Монда В.А., Аблясова А.Г., Алтунин К.В. и др. Влияние углеводородных горючих на коррозию деталей энергоустановок и техносистем многократного использования в наземных и космических условиях. *Матер. докл. 22-й Всерос. межвуз. научно-техн. конф. «Электромеханические и внутрикамерные процессы в энергетических установках, струйная акустика и диагностика, приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий»*. Казань, Изд-во «Отечество», 2010, ч. 2, с. 87–88.
- [10] Алтунин К.В., Гортышов Ю.Ф., Галимов Ф.М. и др. Проблемы осадкообразования в энергоустановках на жидких углеводородных горючих и охладителях. *Энергетика Татарстана*, 2010, № 2, с. 10–17.
- [11] Kelemen S.R., Siksin M., Avery N.L., Rose K.D., Solum M., Pugmire R.J. Gasoline type and engine effects on equilibrium combustion chamber deposits (CCD). *SAE*, 2001, Paper No. 2001-01-3583.
- [12] Kalghatgi G.T. Combustion chamber deposits in spark-ignition engines: a literature review. *SAE*, 1995, Paper No. 952443.
- [13] Дубовкин Н.Ф., Маланичева В.Г., Массур Ю.П., Федоров Е.П. *Физико-химические и эксплуатационные свойства реактивных топлив: Справочник*. Москва, Химия, 1985, 240 с.
- [14] Ковалев Г.И., Зверева Н.С., Денисов Е.Т. и др. Кинетические закономерности окисления топлив в присутствии конструкционных материалов. *Нефтехимия*, 1979, вып. 19, № 2, с. 237–242.
- [15] Федотов М.В., Перминов В.А., Беляев Ю.И. Способ технического диагностирования фильтра тонкой очистки топливной системы дизеля. *Патент РФ на изобретение № 2548236*. МПК G01M 15/09, G01M 15/05. Оpubл. 20.04.2015. Бюл. № 11.
- [16] Романов И.М., Шароглазов Б.А., Кавьяров С.И., Шишков В.В. Система контроля состояния фильтра двигателя внутреннего сгорания. *Патент РФ*

- на изобретение № 2252811. МПК В01D 35/14, 37/04, F02M 37/22. Оpubл. 27.05.2005. Бюл. № 15.
- [17] Катаяма Масанобу, Оцубо Ясухико. Устройство для вычисления перепада давления и способ вычисления перепада давления между входной и выходной частями фильтра, а также устройство для оценки количества отложения и способ оценки количества отложившихся на фильтре твердых частиц. *Патент РФ на изобретение № 2390641*. МПК F01N 11/00. Оpubл. 27.05.2010. Бюл. № 15.
- [18] Большаков Г.Ф. *Физико-химические основы образования осадков в реактивных топливах*. Ленинград, Химия, 1972, 232 с.
- [19] Алтунин К.В. Определение скорости осадкообразования в энергоустановках многоразового использования на углеводородных горючих. *Матер. докл. 6-й Всерос. научно-техн. студ. конф. «Интенсификация тепло- и массообменных процессов в химической технологии», посвященная 90-летию со дня рождения А.Г. Усманова*. Казань, Инновационно-издательский дом «Бутлеровское наследие», 2010, с. 41–45.
- [20] Алтунин К.В. Способ прогнозирования осадкообразования в энергоустановках многоразового использования на жидких углеводородных горючих и охладителях. *Патент РФ на изобретение № 2467195*, кл. F02K 9/00, B64F 5/00, G01N 25/72, G01K 7/02. Бюл. №32 от 20.11.2012.
- [21] Алтунин К.В. Модель идеального осадкообразования в энергоустановках многоразового использования на жидких углеводородных горючих и охладителях. *Матер. докл. 18 Междунар. молодеж. науч. конф. «Туполевские чтения»*. Казань, Изд-во Каз. гос. техн. ун-та им. А.Н. Туполева, 2010, т. 2, с. 66–68.
- [22] 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>
- [23] *Удельное электрическое сопротивление от температуры для различных марок сталей и сплавов*. URL: <https://extxe.com/21002/udelnoe-jelektricheskoe-soprotivlenie-ot-temperatury-dlja-razlichnyh-marok-stalej-i-splavov/> (дата обращения 20.01.2022).
- [24] Саранчук В.И., Ошовский В.В., Лавренко А.Т., Кошкарев Я.М. Метод определения величины электрического сопротивления угля в зависимости от температуры. *Наукові праці донецького національного технічного університету. Серія: "хімія і хімічна технологія"*, 2008, № 134 (10), с. 138–143.
- [25] Агроскин А.А., Петренко И.Г. Электросопротивление сланцев и углей при нагревании. *Изв. АН СССР. ОТН*, 1950, № 1, с. 89–100.

Статья поступила в редакцию 31.01.2022

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Алтунин К.В. Разработка методики расчета перепада давления на топливном фильтре из-за появления углеродсодержащих осадков в среде жидкого углеводородного горючего (охладителя). *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2022, вып. 2. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2022-2-2153>

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

## **A method developed for calculating the fuel filter pressure drop caused by carbon-containing sediments in a liquid hydrocarbon fuel**

© K.V. Altunin

Kazan National Research Technical University  
named after A.N. Tupolev – KAI, Kazan, 420111, Russia

*The paper introduces a theoretical study related to a new method for calculating the fuel filter pressure drop caused by sedimentation in a liquid hydrocarbon fuel (cooler) medium; describes some thermophysical properties of sediments in fuel systems of various heat engines; examines the inventions aimed at preventing the failure of filters and pressure drop in them. As the overview and analysis of scientific and technical literature discovered no methods for calculating the pressure drop on the filters of heat engines and power plants, we developed a new formula for calculating the fuel filter pressure drop caused by sedimentation, taking into account the thermal and electrical nature of carbon-containing sediments. Using this formula, we found a new method for calculating the pressure change, which can be used to calculate the residual life of filter elements, theoretically approved the new method relying on the results of experimental studies by previous researchers who used aviation kerosene. As a result, we obtained the fuel filter operating time to failure in several operating modes. The method proves to be valid, as it is applicable for calculating the pressure drop in almost all ground, air, and aerospace-based heat engines and power plants under various operating conditions of the fuel system. Furthermore, the method can be used with various materials of the metal walls of filter elements, pumping speeds of hydrocarbon fuel, pressures at the fuel filters inlet, temperature conditions inside the fuel supply, and cooling channels of engines and power plants.*

**Keywords:** *temperature, pressure drop, sedimentation, carbonaceous sediment, liquid hydrocarbon fuels and coolants, electrical resistivity*

### REFERENCES

- [1] Chertkov Ya.B. *Sovremennye i perspektivnye uglevodorodnye reaktivnye i dizelnye topliva* [Modern and promising hydrocarbon jet and diesel fuels]. Moscow, Khimiya Publ., 1968, 356 p.
- [2] Van Nostrand W.Z., Leach S.H., Haluske J. *Economic Penalty Associated with the Fouling of Refinery Heat Transfer Equipment*. Washington, 1981, pp. 619–643.
- [3] Altunin V.A., Altunin K.V., Dresvyannikov F.N., et al. Problemy vnutrikamernykh teplovykh protsessov v aviatsionnykh, aerokosmicheskikh i kosmicheskikh energoustanovkakh mnogorazovogo ispolzovaniya [Problems of intra-chamber thermal processes in aviation, aerospace and space power plants of reusable use]. In: *Sb. tez. dokl. Mezhdunar. nauchnogo seminar «Problemy modelirovaniya i dinamiki slozhnykh mezhdistsiplinarykh sistem»* [Book of abstracts of the Int. Sc. seminar “Problems of modeling and dynamics of complex interdisciplinary systems”]. Kazan, KAI Publ., 2010, p. 12.
- [4] Altunin K.V. *Forsunka* [The nozzle]. Patent RF no. 2388966. Bul. no. 13, publ. May 10, 2010, 8 p.
- [5] Altunin K.V. *Forsunka* [The nozzle]. Patent RF no. 2447362. Bul. no. 10, publ. April 10, 2012.

- [6] Altunin K.V. *Funktsionalno-stoimostnoy analiz gorelochnykh ustroystv i forsunok: monografiya* [Functional cost analysis of burners and nozzles: a monograph]. Kazan, KAI Publ., 2020, 156 p.
- [7] Altunin V.A. *Issledovanie osobennostey teplootdachi k uglevodorodnym goryuchim i okhladitelnyam v energeticheskikh ustanovkakh mnogorazovogo ispolzovaniya. Kniga pervaya* [Study of the features of heat transfer to hydrocarbon fuels and coolants in reusable power plants. Book one]. Kazan, Kazanskiy gos. univer. im. V.I. Ulyanova-Lenina Publ., 2005, 272 p.
- [8] Yanovskiy L.S., Ivanov V.F., Galimov F.M., Saggir G.B. *Koksootlozheniya v aviatsionnykh i raketnykh dvigatelyakh* [Coke deposits in aircraft and rocket engines]. Kazan, Abak Publ., 1999, 284 p.
- [9] Altunin V.A., Monda V.A., Ablyasova A.G., Altunin K.V., et al. Vliyanie uglevodorodnykh goryuchikh na korroziyu detaley energoustanovok i tekhnosistem mnogorazovogo ispolzovaniya v nazemnykh i kosmicheskikh usloviyakh [Hydrocarbon fuels affecting the corrosion of parts of power plants and reusable industrial systems in ground and space conditions]. In: *Mater. dokl. 22-y Vseros. mezhvuz. nauchno-tekhn. konf. «Elektromekhanicheskie i vnutrikamernye protsessy v energeticheskikh ustanovkakh, struynaya akustika i diagnostika, pribory i metody kontrolya prirodnoy sredy, veshchestv, materialov i izdeliy»* [Proceedings of the 22nd All-Russian interuniversity scientific and technical conf. "Electromechanical and intra-chamber processes in power plants, jet acoustics and diagnostics, devices and methods for monitoring the natural environment, substances, materials and products"]. Kazan, Otechestvo Publ., 2010, part 2, pp. 87–88.
- [10] Altunin K.V., Gortyshov Yu.F., Galimov F.M., et al. *Energetika Tatarstana — Power industry of Tatarstan*, 2010, no. 2, pp. 10–17.
- [11] Kelemen S.R., Siksin M., Avery N.L., Rose K.D., Solum M., Pugmire R.J. Gasoline type and engine effects on equilibrium combustion chamber deposits (CCD). *SAE*, 2001, paper no. 2001-01-3583.
- [12] Kalghatgi G.T. Combustion chamber deposits in spark-ignition engines: a literature review. *SAE*, 1995, paper no. 952443.
- [13] Dubovkin N.F., Malanicheva V.G., Massur Yu.P., Fedorov E.P. *Fiziko-khimicheskie i ekspluatatsionnye svoystva reaktivnykh topliv: Spravochnik* [Physico-chemical and operational properties of jet fuels: a handbook]. Moscow, Khimiya Publ., 1985, 240 p.
- [14] Kovalev G.I., Zvereva N.S., Denisov E.T., et al. *Neftekhimiya — Petroleum Chemistry*, 1979, no. 19, no. 2, pp. 237–242.
- [15] Fedotov M.V., Perminov V.A., Belyaev Yu.I. *Sposob tekhnicheskogo diagnostirovaniya filtra tonkoy ochistki toplivnoy sistemy dizelya* [Method for technical diagnostics of the diesel fuel system fine filter]. *Patent RF no. 2548236*, MPK G01M 15/09, G01M 15/05. Bul. no. 11, publ. April 20, 2015.
- [16] Romanov I.M., Sharoglazov B.A., Kavyarov S.I., Shishkov V.V. *Sistema kontrolya sostoyaniya filtra dvigatelya vnutrennego sgoraniya* [System for monitoring the condition of the filter of the internal combustion engine]. *Patent RF no. 2252811*, MPK B01D 35/14, 37/04, F02M 37/22. Bul. no.15, publ. May 27, 2005.
- [17] Katayama Masanobu, Otsubo Yasuhiko. *Ustroystvo dlya vychisleniya perepada davleniya i sposob vychisleniya perepada davleniya mezhdv vkhodnoy i vykhodnoy chastyami filtra, a takzhe ustroystvo dliya otsenki kolichestva otlozheniya i sposob otsenki kolichestva otlozhivshikhsya na filtre tverdykh chastits* [A device for calculating differential pressure and method for calculating differential pressure between the inlet and outlet parts of the filter, as well as a device for esti-

- mating the amount of deposition and method for estimating the amount of solid particles deposited on the filter]. *Patent RF no. 2390641*, MPK F01N 11/00. Bul. 15, publ. May 27, 2010.
- [18] Bolshakov G.F. *Fiziko-khimicheskie osnovy obrazovaniya osadkov v reaktivnykh toplivakh* [Physical and chemical bases of sedimentation in jet fuels]. Leningrad, Khimiya Publ., 1972, 232 p.
- [19] Altunin K.V. Opreделение skorosti osadkoobrazovaniya v energoustanovkakh mnogorazovogo ispolzovaniya na uglevodorodnykh goryuchikh [Determination of the rate of sedimentation in reusable power plants running on hydrocarbon fuels]. In: *Mater. dokl. 6-y Vseros. nauchno-tekhn. studench. konf. «Intensifikatsiya teplo- i massoobmennyykh protsessov v khimicheskoy tekhnologii», posvyashchennaya 90-letiyu so dnya rozhdeniya A.G. Usmanova* [Proceedings of the 6th All-Russian scientific and technical student conf. “Intensification of heat and mass transfer processes in chemical technology”, dedicated to the 90th anniversary of the birth of A.G. Usmanov]. Kazan, Innovatsionno-izdatelskiy dom “Butlerovskoe nasledie”, 2010, pp. 41–45.
- [20] Altunin K.V. *Sposob prognozirovaniya osadkoobrazovaniya v energoustanovkakh mnogorazovogo ispolzovaniya na zhidkikh uglevodorodnykh goryuchikh i okhladitelyakh* [A method for predicting sedimentation in reusable power plants on liquid hydrocarbon fuels and coolers]. *Patent RF no. 2467195*, cl. F02K 9/00, B64F 5/00, G01N 25/72, G01K 7/02. Bul. no. 32, publ. November 20, 2012.
- [21] Altunin K.V. Model idealnogo osadkoobrazovaniya v energoustanovkakh mnogorazovogo ispolzovaniya na zhidkikh uglevodorodnykh goryuchikh i okhladitelyakh [Model of ideal sedimentation in reusable power plants on liquid hydrocarbon fuels and coolers]. In: *Mater. dokl. 18 Mezhdunar. molodezh. nauchnoy konf. «Tupolevskie chteniya»* [Proceedings of the 18th Intern. youth scientific conf. “Tupolev Readings”]. Kazan, KAI Publ., 2010, vol. 2, pp. 66–68.
- [22] Altunin K.V. *Inzhenerny zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2021, iss. 10 (118).  
<http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2021-10-2119>
- [23] *Udelnoe elektricheskoe soprotivlenie ot temperatury dlya razlichnykh marok staley i splavov* [Specific electrical temperature resistance for various grades of steels and alloys]. Available at: <https://extxe.com/21002/udelnoe-jelektricheskoe-soprotivlenie-ot-temperatury-dlja-razlichnyh-marok-stalej-i-splavov/> (accessed January 20, 2022).
- [24] Saranchuk V.I., Oshovskiy V.V., Lavrenko A.T., Koshkarev Ya.M. *Naukovi pratsi donetskogo natsionalnogo tekhnichnogo universitetu. Seriya: Khimiya i khimichna tekhnologiya (Scientific papers of Donetsk National Technical University. Series: Chemistry and chemical technology)*, 2008, no. 134 (10), pp. 138–143.
- [25] Agroskin A.A., Petrenko I.G. *Izv. AN SSSR. OTN (Proceedings of the Academy of Sciences of the USSR. Engineering Sciences)*, 1950, no. 1, pp. 89–100.

**Altunin K.V.**, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Heat and Power Engineering, Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev — KAI. Research interests: heat exchange, heat transfer in liquid and gaseous hydrocarbon fuels. Author of inventions (utility models) in the field of heat exchange, transport, sports. e-mail: altkonst881@yandex.ru