

# Эмпирические модели ресурсной наработки и динамики жидкофазных коксоотложений при нагреве авиационного керосина

Шлякотин В.Е., Шихман Ю.М.

Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова, г. Москва

e-mail: veshlyakotin@ciam.ru

Приведено описание систематического экспериментального исследования нагрева авиационного керосина до температур 500...900 К при сверхкритических давлениях в модельном топливном канале с обогревом стенок электрическим током. опыты проведены в широком диапазоне изменения расходных и тепловых параметров. На основе результатов экспериментов разработаны эмпирическая модель перегрева стенки канала, обусловленного отложениями кокса, и расчетная модель динамики изменения толщины кокса на стенках каналов в области жидкофазных коксоотложений. Модели позволяют оценить для этих условий параметры теплообменников с нагревом керосинов РТ и ТС-1 и возможные времена наработки до достижения предельных конструктивно-допустимых температур стенок топливных каналов.

**Ключевые слова:** авиационный керосин, нагрев углеводородных топлив, жидкофазное коксоотложение, математическая модель, теплообмен.

## Empirical models of the resource operating time and the liquid phase coke deposit formation dynamics under the aviation kerosene heating

Shlyakotin V.E., Shikhman Yu.M.

CIAM, Moscow

The systematic experimental study of the aviation kerosene heating up to temperatures of 500...900 K at supercritical pressures in the model fuel channel with walls heating by electric current is described. The experiments were carried out for a wide range of the fuel consumptions and thermal parameters. Based on these experimental results the empirical model of the channel wall overheating caused by coke deposits formation and the mathematical model of the coke thickness dynamics on channel walls in the region of liquid-phase coke deposits formation are developed. For these condition both models allow estimating f heat exchangers parameters during the RT and TS-1 kerosenes heating and the possible operating time before achieving the maximum constructive-permissible temperatures of the fuel channel walls.

**Keywords:** aviation kerosene, hydrocarbon fuels heating, liquid-phase coke deposit formation, mathematical model, heat exchange.

### Введение

Современные тенденции развития воздушно-реактивных двигателей (ВРД) для перспективных летательных аппаратов обуславливают разработку двигателей с высоким уровнем параметров ( $p > 50$  атм и  $T > 2000$  К) и КПД узлов, развитие новых технологий, материалов и топлив. При этом увеличивается потребность

в использовании хладоресурса топлива в теплообменниках (ТО) систем охлаждения конструкций узлов и рабочих тел.

Для некриогенных углеводородных топлив (УВТ) увеличенный хладоресурс (физический и химический) образуется при нагреве топлива вследствие его эндотермических термохимических превращений. Величина суммарного хладоресурса УВТ, в том числе авиационных

керосинов, достаточно велика, что может значительно расширить диапазон работы углеводородных ВРД.

Однако использованию УВТ повышенного хладоресурса препятствует проблема коксоотложений на обогреваемых поверхностях топливных систем и систем охлаждения. Наличие кокса может нарушить работу топливных агрегатов, ухудшить теплообмен, изменяя параметры системы охлаждения, вплоть до разрушения конструкции. Таким образом, проблема коксоотложений требует специального рассмотрения при разработке топливных систем и ТО и определении их ресурса (времени наработки) [1, 2].

Различают два этапа коксообразования и, соответственно, два вида кокса. Первый этап – низкотемпературный, с образованием жидкофазного кокса, ограничен температурами УВТ, близкими к критическим и меньшими температур начала разложения. Второй этап – высокотемпературный, реализуется при нагреве УВТ от начала термодеструкции с образованием пироуглерода, основы высокотемпературного кокса. И если проблему образования пироуглерода можно решить путем применения специальных конструкций, уменьшающих нагрев и степень разложения УВТ, то проблема уменьшения (устранения) низкотемпературных жидкофазных коксоотложений является более сложной и требует специальной обработки топлива, в частности, устранения нежелательных примесей и растворенного кислорода [1].

Проблема кокса рассматривалась во многих работах. В частности, были разработаны сложные методы расчета коксоотложений, но при этом чрезвычайно мало опытных данных для верификации моделей, достоверного прогноза отложений жидкофазного кокса и его влияния на параметры топливных трактов, в которых нагревается топливо. Поэтому авторами было выполнено систематическое экспериментальное исследование процессов жидкофазного коксоотложения при нагреве авиационного керосина в обогреваемых топливных каналах трубчатого ТО [3]. В настоящей работе проведена систематизация экспериментальных данных с разработкой на их основе инженерных методик предварительной оценки времени наработки обогреваемых топливных каналов.

## Краткое описание эксперимента

Исследовались коксоотложения в модели трубчатого ТО с подогревом топлива при ресурсных испытаниях с периодами непрерывной работы от 2 до 6 ч, соответствующими возможным полетным циклам двигателя. В качестве топлива использованы керосины РТ и ТС-1, как типичные и предпочтительные для применения УВТ повышенного хладоресурса, нагреваемые за счет

электрического подогрева стенок канала модельного ТО. Опыты проведены при постоянной тепловой нагрузке (постоянный расход топлива и тепловой поток) в температурной области жидкофазного окисления керосина с образованием низкотемпературного кокса без термодеструкции ( $T_T < 850$  К), т.е. в области, наиболее критичной для ТО перспективного ТРДД гражданской авиации.

Время наработки определялось по температуре  $T_w$  наружной поверхности трубки модельного ТО, возрастающей до максимально допустимого значения при нарастании слоя кокса (перегрев стенки), и ее изменению по времени, косвенно характеризующему уровень коксоотложений. Для определения толщины слоя кокса по длине трубки после достижения предельной наработки трубка разрезалась на отдельные образцы по характерным сечениям, в которых толщина кокса измерялась различными методами: микрофотографированием шлифа, измерениями нутромером или под микроскопом. Для расчета толщины слоя кокса также разработана методика, основанная на модели одномерного стационарного течения топлива в обогреваемом канале и решении обратной задачи по измеренным расходу, температуре и давлению топлива на входе в ТО, температуре на выходе, подводимой электрической мощности и распределению  $T_w(x)$  с учетом данных работы [1] по свойствам коксоотложений.

Канал модельного ТО представлял собой трубку диаметром  $\varnothing 3$  мм с толщиной стенки 0,5 мм (материал – сталь 12Х18Н10Т) с уровнем шероховатости внутренней поверхности, соответствующим ГОСТу на гладкие цельнотянутые стальные капиллярные трубки. Трубка препарирована по длине наружной поверхности 20-ю накладными ХА-термопарами. Погрешности измерений температуры – менее 2...3°C, давлений – до 0,3%, расхода керосина – до 1%, электрических параметров – до 1% (вольтметр и амперметр).

Режимные параметры испытаний соответствовали параметрам ТО в двигателях, использующих хладоресурс УВТ. При расходе керосина 2,0...6,4 г/с массовая скорость потока  $\rho U$  изменялась в диапазоне 630...2000 кг/(с·м<sup>2</sup>), давление на входе  $p_{вх} = 4...6$  МПа, температура на входе  $T_{вх} = 280...310$  К, температура на выходе  $T_{вых} = 430...830$  К (в одном опыте 910 К), удельный тепловой поток  $q_w = 0,1...0,8$  МВт/м<sup>2</sup>. Диапазон чисел Рейнольдса охватывал все режимы течения – ламинарный и переходный на большей части длины канала, развитый турбулентный, преимущественно на конечном участке канала.

Опыты проводились сериями, с новой трубкой модельного ТО в каждой серии. Длительность одного опыта – 1,5...2,5 ч, количество опытов в серии определялось достижением максимальной температуры

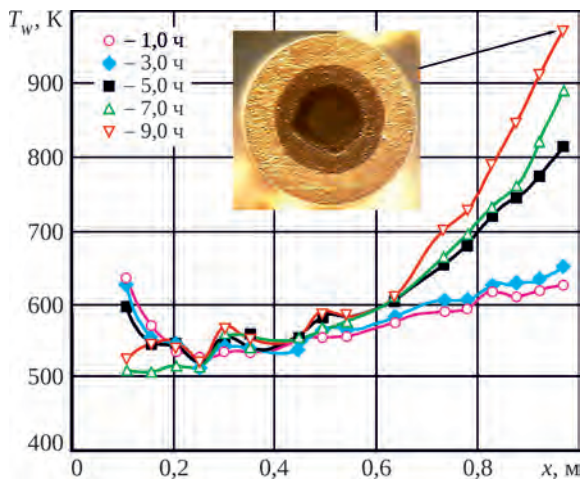


Рис. 1. Температуры поверхности трубки ТО при различной наработке и фотография слоя кокса на срезе образца

стенки  $T_{w \max} = 970 \dots 1030$  К. Параметры ТО измерялись с интервалом  $1 \dots 10$  мин в зависимости от величины потока  $q_w$  и скорости изменения температуры  $T_w$  по времени  $\tau$ . По окончании серии из трубки в местах измерений температуры вырезались образцы (тонким алмазным кругом), в которых определялась толщина слоя кокса. Пример изменения продольного распределения температуры поверхности трубки ТО по времени наработки показан на рис. 1. Там же приведена фотография микрошлифа образца, на котором хорошо виден толстый слой кокса.

### Эмпирическая модель времени перегрева стенки топливного канала при жидкофазном коксоотложении

Поскольку перегрев стенки обусловлен ростом коксоотложений в топливном канале, то величина максимальной температуры стенки  $T_{w \max}$  может вместе с другими теплотехническими параметрами ТО характеризовать время его наработки до достижения заданного предельного значения. В данной работе, по аналогии с [3], предложено обобщение опытных данных по предельной наработке (перегреву) модельных топливных каналов в условиях жидкофазного коксообразования в виде размерных комплексов, зависящих от основных параметров ТО при исходном («чистом») состоянии каналов. Для большей достоверности и расширения диапазона  $T_{w \max}$  использованы данные всех проведенных измерений – как при  $T_{w \max}$  в каждой серии, так и при  $T_w < T_{w \max}$ .

На рис. 2 показана обобщенная аппроксимационная модель в виде связей комплексных параметров  $\tau_{\text{нар}}/\rho U$  и  $(T_{w \max} - T_{\text{Т.ВЫХ}})/q_{w0}$ , где  $\tau_{\text{нар}}$  – время наработки, с;  $\rho U$  – массовая скорость потока,  $\text{кг}/(\text{с}\cdot\text{м}^2)$ ;  $T_{w \max}$  и  $T_{\text{Т.ВЫХ}}$  – максимальная температура стенки

топливного канала и температура топлива на выходе из ТО, К;  $q_{w0}$  – удельный тепловой поток в «чистом» топливном канале,  $\text{ккал}/(\text{с}\cdot\text{м}^2)$ . Для повышения точности аппроксимации данных модель структурирована по четырем диапазонам  $T_{w \max}$ :  $680 \dots 790$ ,  $800 \dots 900$ ,  $900 \dots 980$  и  $1050 \dots 1170$  К.

В первом диапазоне ( $T_{w \max} = 680 \dots 790$  К) погрешность  $\delta_\tau$  определения времени наработки  $\tau_{\text{нар}}$  для трех из 13 точек превышает 150% (одна точка – завышенное значение, две другие – заниженные), а для остальных точек  $\delta_\tau < 30 \dots 35\%$ .

Во втором диапазоне ( $T_{w \max} = 800 \dots 900$  К) только для одной из 15 точек погрешность  $\delta_\tau \approx 60\%$ , а для остальных –  $\delta_\tau < 20\%$ . Важно, что в этом диапазоне имеет место хорошее совпадение с данными работы [1] (символ  $\diamond$  на рис. 2). Отметим также, что из-за близости величин  $\tau_{\text{нар}}$  первого и второго диапазонов следует рассматривать объединенный диапазон  $T_{w \max} = 680 \dots 900$  К.

В третьем диапазоне ( $T_{w \max} = 900 \dots 980$  К) максимальная погрешность  $\delta_\tau = 30 \dots 35\%$ , для большинства точек  $\delta_\tau < 20\%$ .

Погрешности  $\delta_\tau$  в четвертом диапазоне (с высокими температурами  $T_{w \max} = 1050 \dots 1170$  К) минимальны, однако данных в этом диапазоне недостаточно.

В результате эмпирическая модель времени перегрева стенки топливных каналов керосиновых ТО с изменением температуры стенки от  $T_{w0}$  (при  $\tau = 0$ ) до  $T_{w \max}$  (при  $\tau = \tau_{\text{нар}}$ ) может быть представлена в виде:

$$\tau_{\text{нар}} = \rho U \cdot a(T_{w \max}) \left[ \frac{T_{w \max} - T_{\text{Т.ВЫХ}}}{q_{w0}} \right]^{b(T_{w \max})}$$

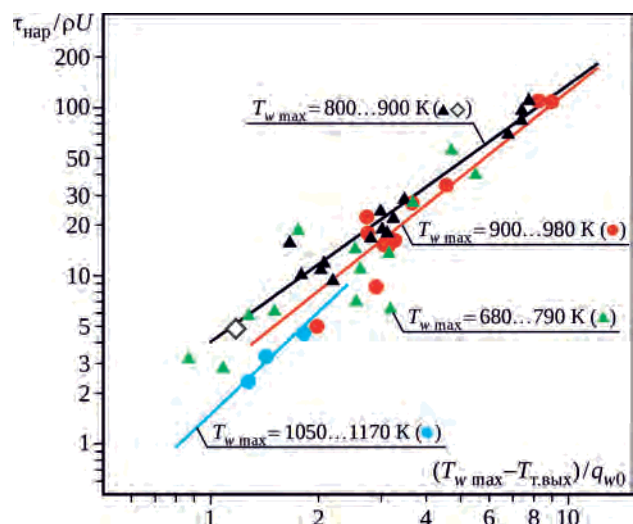


Рис. 2. Аппроксимирующие функции модели времени перегрева стенок топливного канала ТО:  
 $\blacktriangle, \blacktriangle, \bullet, \bullet$  – опыты авторов;  $\diamond$  – опыты [1];  
 линии – аппроксимация

Функции  $a(T_{w \max})$  и  $b(T_{w \max})$  хорошо аппроксимируются полиномами второй степени с учетом того, что:

$$\begin{aligned} a &= 4,04 \text{ и } b = 1,53 \text{ для } T_{w \max} = 680 \dots 900 \text{ К;} \\ a &= 2,50 \text{ и } b = 1,70 \text{ для } T_{w \max} = 900 \dots 1000 \text{ К;} \\ a &= 1,50 \text{ и } b = 2,00 \text{ для } T_{w \max} = 1000 \dots 1200 \text{ К.} \end{aligned}$$

Для использования модели целесообразно рассмотреть по имеющимся опытным данным динамику нагрева стенки ТО. Это позволит оценить временной интервал, в котором можно ожидать перегрева стенки (достижения  $T_{w \max}$ ) при  $\tau < \tau_{\text{нар}}$ , и таким образом оценить погрешность модели.

Динамику процесса перегрева стенки ТО можно характеризовать изменением относительной величины увеличения температуры  $T_w$  по относительному времени (рис. 3). Анализ показал, что кривая  $\Delta T_w(\tau) / \Delta T_{w \max} = f(\tau / \tau_{\text{нар}})$  асимптотически приближается к значению 1,0 при  $\tau \rightarrow \tau_{\text{нар}}$  только при малых величинах  $\rho U$  и  $q_w$ , и в этом случае перегрев возможно ожидать по меньшей мере за 30...40% времени до достижения  $\tau_{\text{нар}}$ . Во всех других случаях при большей теплонпряженности ТО (больших величинах  $\rho U$  и  $q_w$ ) нагрев трубки в окрестности  $\tau \rightarrow \tau_{\text{нар}}$  характеризуется большим временным градиентом  $T_w$ , т.е. перегрев может проявиться только в непосредственной близости от расчетного времени наработки  $\tau_{\text{нар}}$ .

### Эмпирическая расчетная модель динамики жидкофазных коксоотложений

Образование и отложения низкотемпературного кокса на стенках топливного тракта происходят в результате сложных многостадийных физико-химических процессов в топливе. Однако, как показали предварительные проработки, на базе большого объема данных систематических экспериментов (например, представленных выше) возможна разработка упрощенной эмпирической модели динамики изменения толщины жидкофазных коксоотложений по длине топливного канала, пригодной для инженерных оценок ресурса топливных систем.

Эмпирическая модель динамики изменения толщины слоя кокса, создаваемая на базе результатов опытов с модельными трубчатыми ТО, основана на математической модели одномерного стационарного течения авиационного керосина в канале с электрическим обогревом стенок. Модель определяет основные параметры керосина и температуру стенки канала при заданных размерах канала, параметрах керосина на входе (расход, давление и температура), подводимой электрической мощности и распределении толщины слоя кокса по длине канала  $\delta_c(x)$  в виде кусочно-

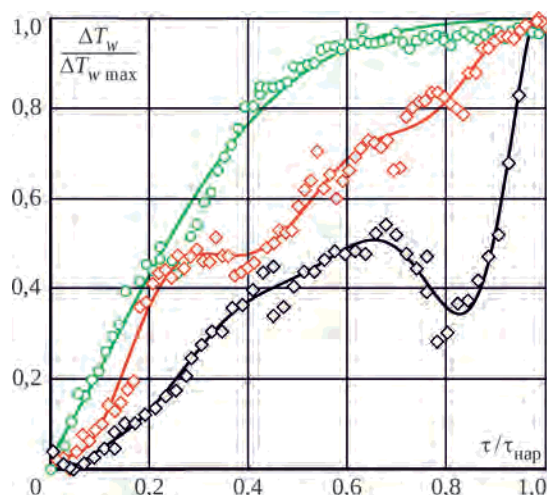


Рис. 3. Пример динамики процессов перегрева стенок модельного ТО:

- —  $T_{w \max} = 610 \dots 950 \text{ К}; q_w = 44,7 \text{ ккал}/(\text{с} \cdot \text{м}^2); G_T = 2 \text{ г}/\text{с}; T_{\text{т.вых}} = 535 \text{ К}; \tau_{\text{нар}} = 19,7 \text{ ч}$  (серия 6);
- ◇ —  $T_{w \max} = 590 \dots 970 \text{ К}; q_w = 93,9 \text{ ккал}/(\text{с} \cdot \text{м}^2); G_T = 4,2 \text{ г}/\text{с}; T_{\text{т.вых}} = 535 \text{ К}; \tau_{\text{нар}} = 13 \text{ ч}$  (серия 7);
- ◇ —  $T_{w \max} = 680 \dots 970 \text{ К}; q_w = 129 \text{ ккал}/(\text{с} \cdot \text{м}^2); G_T = 4,0 \text{ г}/\text{с}; T_{\text{т.вых}} = 618 \text{ К}; \tau_{\text{нар}} = 8 \text{ ч}$  (серия 8)

линейной функции, интерполирующей измеренные значения  $\delta_{c,i} = \delta(x = x_i)$  на метровой длине трубки ТО. Результаты расчетов распределений температуры  $T_w(x)$  при заданных распределениях толщин коксоотложений показали удовлетворительное совпадение с экспериментальными данными.

Аналогично [1] динамику изменения по времени термического сопротивления слоя кокса  $R_c = \delta_c / \lambda_c$ , характеризующего его толщину, и коэффициент теплопроводности кокса  $\lambda_c$  предложено определять следующими зависимостями:

$$\begin{aligned} R_c &= R_{c \max} (1 - e^{-K\tau}); \\ \lambda_c &= \Pi \lambda_{\tau,w} + (1 - \Pi) \lambda_{c,d}, \end{aligned}$$

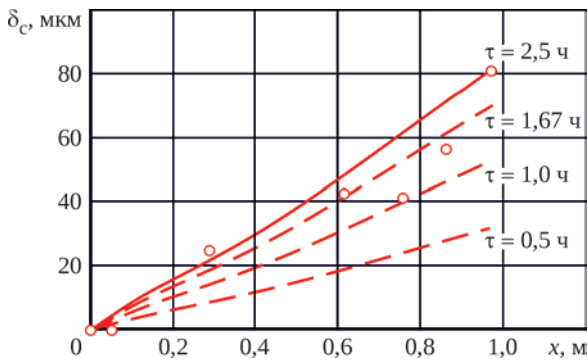
где  $\Pi = 0,0426 / \rho_{c,d} \ln \{ \Pi / \rho_{\tau,w} + (1 - \Pi) / \rho_{c,d} \}$  — неявная зависимость получена из соотношения

$$\rho_c = 1 / \left( \frac{1 - \Pi}{\rho_{c,d}} + \frac{\Pi}{\rho_{\tau,w}} \right)$$

и аппроксимационной зависимости

$$\rho_c = \rho_{c,d} e^{-23,47 \Pi^{0,666}} \text{ (обобщение данных [1]);}$$

$R_{c \max}$  — максимальное значение сопротивления  $R_c$ ;  $K$  — константа скорости процесса коксоотложений;  $\tau$  — время;  $\Pi$  — коэффициент пористости кокса ( $0 < \Pi < 1$ );  $\rho_{c,d}$  и  $\lambda_{c,d}$  — плотность и теплопроводность сухого кокса;  $\rho_{\tau,w}$  и  $\lambda_{\tau,w}$  — плотность и теплопроводность топлива при средней температуре кокса.



**Рис. 4.** Динамика распределения толщины слоя кокса при нагреве керосина РТ в трубчатом канале (линии – расчет,  $\circ$  – эксперимент при наработке 2,5 ч)

Плотность сухого кокса принята  $\rho_{c,d} = 1000 \text{ кг/м}^3$ . В отсутствие открытых данных по теплопроводности сухого кокса использовано значение  $\lambda_{c,d} = 0,29 \text{ Вт/(м·К)}$ , характерное для котельного шлака [4].

Отметим, что для учета физических особенностей процессов коксоотложения, в отличие от работы [1], параметры  $R_{c,max}$  и  $K$  предполагались зависящими от размеров канала и параметров топлива.

В соответствии с предложенным подходом формирование модели динамики сводилось к определению эмпирических коэффициентов  $R_{c,max}$  и  $K$  и проводилось в два этапа.

На первом этапе при известном (по результатам измерений в последнем опыте каждой серии) распределении толщины кокса рассчитывались распределения параметров в топливном тракте и проводилась аппроксимация данных по  $R_{c,i}$  ( $i$  – номер точки замера  $T_w$  и  $\delta_c$ ) зависимостью вида  $R_c = aT_{w,c}$ , где  $T_{w,c}$  – расчетная температура поверхности слоя кокса, контактирующей с топливом. Далее с учетом известного времени наработки для данной серии опытов определялся параметр  $K$  из выражения

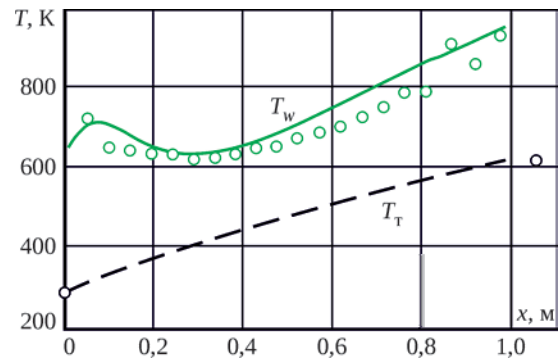
$$R_{c,i} / aT_{w,c} = b(1 - e^{-K\tau}).$$

На втором этапе величины  $K$  и  $R_{c,max} = abT_{w,c}$ , определенные по опытам с известными толщинами слоя кокса, аппроксимируются многопараметрическими функциональными зависимостями:

$$R_{c,max} = \frac{xT_{w,c}}{\rho_{T0}U_{T0}} \left( 4,5 - 1,04 \cdot 10^{-5} \exp(0,0254(T_{T0} \cdot 10^3)^{-5}) \right);$$

$$K = 230G_T / (L_{Tp}d_{Tp}\rho_{T0}),$$

где  $\rho_{T0}$  – плотность топлива,  $\text{кг/м}^3$ ;  $U_{T0}$  – скорость топлива,  $\text{м/с}$ ;  $G_T$  – расход топлива,  $\text{кг/с}$ ;  $d_{Tp}$  и  $L_{Tp}$  – диаметр и длина трубки ТО,  $\text{м}$ ; индекс «0» – для параметров на входе в канал.



**Рис. 5.** Распределения температуры стенки и топлива при нагреве керосина РТ в трубчатом канале (линии – расчет;  $\circ, \circ$  – эксперимент при наработке 2,5 ч)

Таким образом, расчетная эмпирическая модель динамики коксоотложений состоит из уравнений неразрывности и энергии для одномерного стационарного течения топлива в обогреваемом канале и соотношений, определяющих величины  $R_{c,max}$  и  $K$  (т.е. толщину слоя кокса).

Пример расчета динамики изменения толщины слоя кокса и параметров топливного канала с использованием разработанной эмпирической модели показан на рис. 4 и рис. 5. Видно удовлетворительное соответствие расчетных и экспериментальных данных.

## Заключение

На основе результатов экспериментального исследования нагрева авиационных керосинов РТ и ТС-1 до температур 500...900 К в обогреваемом модельном топливном канале при сверхкритических давлениях разработаны эмпирические аппроксимационная модель времени перегрева  $\tau_{нар}$  с достижением предельных температур стенки  $T_{w,max}$  и расчетная модель динамики жидкофазных отложений кокса.

Модели позволяют приближенно оценивать параметры теплообменников с нагревом керосинов, толщины слоя коксоотложений и возможные максимальные времена наработки до достижения предельных конструктивно-допустимых температур стенок топливных каналов.

Наиболее достоверными эти оценки будут для нагрева керосина при сверхкритических давлениях 4...6 МПа без процессов термодеструкции до температур, не превышающих 850...870 К, при температурах стенок каналов  $T_{w,max} = 650...1200 \text{ К}$ , массовых скоростей потока  $\rho U = 600...2000 \text{ кг/(с·м}^2)$ , тепловых потоков  $q_w = 0,15...0,85 \text{ МВт/м}^2$ , для широко применяемых в промышленности керосина РТ и коррозионностойких сталей типа 12Х18Н10Т.

---

## Литература

1. Яновский Л.С., Иванов В.Ф., Галимов Ф.М., Сапгир Г.Б. Коксоотложения в авиационных и ракетных двигателях. Казань: Издательство «Абак», 1999. 284 с.
2. Шихман Ю.М. Углеводородные топлива повышенного хладоресурса для высокоскоростных и высокотемпературных воздушно-реактивных двигателей. Аналитические обзоры. Ч. I и II / под ред. Л.С. Яновского. № 432, № 433. М.: ЦИАМ, 2008.
3. Шлякотин В.Е., Шихман Ю.М., Митрофанов К.Е. и др. Экспериментальное исследование коксоотложения в модели трубчатого теплообменника при нагреве керосина в условиях жидкофазного окисления // Труды ЦИАМ № 1343. Авиационные двигатели и силовые установки / под ред. А.И. Ланшина. М.: ТОРУС ПРЕСС, 2010. С. 386–400.
4. Бабичев А.П., Бабушкина Н.А., Братковский А.М. и др. Физические величины. Справочник. М.: Энергоатомиздат, 1991. 1232 с.

## References

1. Ianovskii L.S., Ivanov V.F., Galimov F.M., Sapgir G.B. Koksootlozheniia v aviatsionnykh i raketnykh dvigateliakh [Coke Deposit Formation in Aviation and Rocket Engines]. Kazan: Abak publ., 1999. 284 p.
2. Shikhman Iu.M. Uglevodorodnye topliva povyshennogo khladoresursa dlia vysokoskorostnykh i vysokotemperaturnykh vozduшно-reaktivnykh dvigatelei [Hydrocarbon Fuels with the Increased Cooling Capacity for High-Velocity and High-Temperature Air Breathing Engine]. Analytical reviews. Parts 1 and 2. Edited by L.S. Ianovskii. No. 432, No. 433. Moscow: CIAM, 2008.
3. Shliakotin V.E., Shikhman Iu.M., Mitrofanov K.E. i dr. Eksperimental'noe issledovanie koksootlozheniia v modeli trubchatogo teploobmennika pri nagreve kerosina v usloviakh zhidkofaznogo okisleniia [An Experimental Study of Coke Deposit Formation in a Model of a Tubular Heat Exchanger during the Kerosene Heating under the Liquid-Phase Oxidation Conditions]. Proc. of CIAM. Aviatsionnye dvigateli i silovye ustanovki [Aviation Engines and Propulsions]. Edited by A.I. Lanshin. No. 1343. Moscow: TORUS PRESS, 2010. P. 386–400.
4. Babichev A.P., Babushkina N.A., Bratkovskii A.M. et al. Fizicheskie velichiny [Physical Quantities]. Handbook. Moscow: Energoatomizdat, 1991. 1232 p.