УДК 662.742 + 665.743.3 + 66.092.892

ВЛИЯНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ РАСТВОРЕННОГО КИСЛОРОДА НА СВЕРХКРИТИЧЕСКОЕ ТЕРМИЧЕСКОЕ ОКИСЛИТЕЛЬНОЕ КОКСОВАНИЕ АВИАЦИОННОГО КЕРОСИНА RP-3

© 2021 г. Qin Huang^{1,2}, Yu Chen^{1,2}, Zewei Bao^{1,2,*}, Quan Zhu^{1,2}

¹ School of Chemical Engineering, Sichuan University, Chengdu, Sichuan, 610065 China
² Engineering Research Center of Combustion and Cooling for Aerospace Power, Ministry of Education, Sichuan University, Chengdu, Sichuan, 610065 China
*E-mail: zewei.bao@scu.edu.cn

> Поступила в редакцию 27 октября 2020 г. После доработки 4 апреля 2021 г. Принята к печати 1 октября 2021 г.

Изучено влияние концентрации растворенного кислорода на термическое закоксовывание авиационного керосина RP-3 (Китай) на специально спроектированной и построенной установке деоксигенации. Определено количество кокса, образующегося при различных исходных концентрациях растворенного кислорода, изучена морфология и проведен анализ элементного состава коксовых отложений, а также измерено распределение концентрации растворенного кислорода вдоль электронагреваемой трубки. Показано, что низкая исходная концентрация растворенного кислорода приводит к значительно меньшему количеству кокса термического окисления; однако в условиях кислородного голодания кокс полностью не удаляется, хотя морфология его поверхности меняется. Установлено также, что закоксовывание зависит от температуры и концентрации растворенного кислорода и снижается вдоль трубки, а при осевом положении 40–50 см резко падает.¹

Ключевые слова: термоокислительное коксование, растворенный кислород, авиационный керосин RP-3, сверхкритическое давление

DOI: 10.31857/S0028242121060150

Поскольку увеличение числа Маха в полете требует значительного повышения качества системы охлаждения, для авиационных двигателей все большее применение находит технология охлажденного охлаждающего воздуха (the cooled cooling air (CCA) technology). В этой технологии авиационное топливо используется для охлаждения воздуха для турбины [1]. Однако, когда температура топлива достигает 150°С, может образовываться кокс термического окисления, который способен не только блокировать сопла и трубки сгорания, но и влиять на характеристики теплопередачи и безопасную работу двигателей [2–5].

На термическое окислительное коксование авиационного топлива могут влиять различные факторы. Не и др. [6] исследовали загрязнение топлива JP-10 и обнаружили, что температура стенки и топлива оказывают важное влияние на осаждение кокса. Fu и др. [7-8] изучали вопрос о том, как винтовая центробежная сила может ингибировать термическое окислительное коксование. В их исследовании винтовые трубки с авиационным керосином напрямую нагревались электричеством через два медных зажима снаружи трубок. При этом суммарная температура топлива изменялась от 400 до 723 К, а масса потока авиационного керосина – от 393 до 1178 кг/м² с. Соответственно, согласно критическим данным Рейнольдса, течения находились в ламинарном и турбулентном состояниях. Авторы обнаружили, что распределение коксования в спи-

¹ Дополнительные материалы для этой статьи доступны по DOI: 10.31857/S0028242121060150 для авторизованных пользователей.

ральных трубах было более равномерным, а максимальное общее количество кокса уменьшилось по сравнению с прямой трубкой. Zhao и др. [9] обнаружили, что повышение температуры и содержания кислорода усиливают ингибирование цепной реакции углеводородного топлива бутилгидрокситолуолом (бутилированным гидрокситолуолом, БГТ), но их ингибирующие эффекты были слабее, чем стимулирующее действие кислорода.

Alborzi и др. [10] разработали двухступенчатую химическую кинетическую модель переходного топлива для моделирования роста отложений в зависимости от времени, температуры и химического состава топлива при репрезентативном состоянии двигателя. Они наблюдали кольцевой профиль углеродистых отложений и оценивали его толщину путем интегрирования их средней толщины в пяти поперечных сечениях вдоль трубы с помощью сканирующего электронного микроскопа. Alborzi и др. [11-12] изучали влияние почти полной деоксигенации и удаления полярных частиц на склонность к осаждению топлива Jet A-1 с предельной термоокислительной стабильностью в специальном устройстве для испытания на термостойкость с высоким коэффициентом Рейнольдса. Они обнаружили, что когда исходная концентрация всех гидропероксидов в реактивном топливе была относительно высокой, деоксигенация топлива не могла снизить склонность кокса к осаждению. Впоследствии было обнаружено, что удаление химически активных компонентов серы и Fe снижает предрасположенность к поверхностному осаждению кокса, и предложили механизмы воздействия реактивной серы и Fe с гидропероксидами.

Liu и др. [13] также обнаружили, что агрегация полярных частиц в авиационном топливе может способствовать термоокислительному осаждению в отсутствии растворенного кислорода. Кроме того, предварительное окисление и электролитическая пассивация труб из нержавеющей стали, а также добавление диспергатора в топливо RP-3 могут уменьшить отложения при термическом окислении топлива [14–15].

Кислород, растворенный в топливе, играет решающую роль в образовании термически окисленного кокса. Он вступает в реакцию с топливом с образованием свободных радикалов, которые затем запускают серию цепных реакций свободных радикалов. Ervin и др. [16] обнаружили, что деоксигенация топлива может иногда увеличивать поверхностное загрязнение, а отложения, образованные деоксигенированным топливом и частичным потреблением кислорода, отличаются от отложений топлива, насыщенного воздухом, и полным потреблением кислорода. Поэтому авторы предположили, что существует наименее подходящая концентрация растворенного кислорода, которая приводит к максимальному количеству отложений для данной системы. Roan и др. [17] также обнаружили, что удаление растворенного кислорода посредством барботирования азота не всегда снижает количество автоокислительных отложений в проточном реакторе. Они думали, что гидроароматические соединения в гидроочищенном топливе и нафтеновые соединения в насыщенном топливе обеспечивают большую стабильность топлива.

Zabarnick и др. [18] использовали метод измерения «микробаланс/давление» для кварцевого кристалла (the quartz crystal microbalance/pressure measurement technique) при изучении термической стабильности и характеристик окисления реактивного топлива. Они обнаружили, что общее количество осажденного вещества и скорость его осаждения сложным образом зависят от скорости потребления растворенного кислорода. Было обнаружено, что удаление кислорода из топлива оказалось очень эффективным в подавлении автоокислительного образования кокса [19-20]. Разница в термической стабильности топлив, как они считают, может быть объяснена различиями в их составе, например, полярных частиц, исходных гидропероксидов, реакционноспособных компонентов серы и железа, гидроароматических и нафтеновых соединений. Реі и др. [21] исследовали зависимость термоокислительного коксования топлива RP-3 от концентрации растворенного кислорода и обнаружили, что изменение доли потребления кислорода является псевдопервым порядком по отношению к температуре топлива на выходе. Тем не менее, потребление растворенного кислорода в реакции термического окисления до конца не изучено.

В данном исследовании была предложена методика деоксигенации и разработано поточное устройство для количественного определения концентрации растворенного кислорода. Исследован процесс термического окисления кокса при раз-



Рис. 1. Принципиальная схема экспериментальной установки: *1* – топливный резервуар; *2* – магнитная мешалка; *3* – датчик растворенного кислорода; *4* – насос высокого давления; *5* – игольчатый клапан; *6* – массовый расходомер; *7* – датчик давления; *8* – термопара в оболочке типа К; *9* – провода термопары типа К; *10* –трубка; *11* – система электрообогрева; *12* – система сбора данных; *13* – компьютер для регистрации данных; *14* – система быстрого охлаждения; *15* – обратный клапан; *16* – топливный коллектор (точка измерения растворенного кислорода); *17* – резервуар отработанного топлива.

личных исходных концентрациях растворенного кислорода. Кроме того, были также измерены распределение концентрации растворенного кислорода, температура топлива и стенки вдоль трубки. Для описания морфологии и анализа элементного состава отложений были использованы сканирующий электронный микроскоп (SEM/CЭM) и энергодисперсная спектроскопия (EDS/ЭДС).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Материалы. Все материалы, использованные в работе, были промышленных марок. Авиационный керосин RP-3 был предоставлен компанией Zhejiang Petrochemical Co. Ltd. (Чжоушань, Китай). N_2 чистотой 99.999% был поставлен компанией Jinnengda Gas Co. Ltd. (Чэнду, Китай). Трубку из нержавеющей стали SS304 (внутренний диаметр 2.0 мм, внешний диаметр 3.0 мм) длиной 1000 мм использовали в качестве электрически нагреваемой пробирки. Технические характеристики авиационного керосина RP-3 приведены в табл. 1.

НЕФТЕХИМИЯ том 61 № 6 2021

Аппараты и процедуры. На рис. 1 представлена принципиальная схема экспериментальной установки. Суммарные температуры топлива на входе и выходе из трубки измеряли термопарами в оболочке типа К. Температуру стенок также измеряли термопарами типа К, приваренными к внешней стенке трубки с интервалом 100 мм. Массовый расход топлива контролировали в режиме on line с помощью массового расходомера (CMF010M, Emerson). Содержание растворенного кислорода в

Таблица 1. Технические характеристики авиационного керосина RP-3

Свойство	Значение
Критическое давление	2.39 МПа
Критическая температура	372.5°C
Плотность	0.7928 г/см ³
Температура вспышки	50°C
Диапазон перегонки	163–212°C
Относительная молекулярная масса	148.33 г/моль
Средняя молекулярная формула	$C_{10.5}H_{22}$

 Прибор
 Диапазон измерения
 Точность

 Датчик давления
 0–10 МПа
 ±0.25%

 Термопара типа К
 0–1200°С
 ±0.4%

 Массовый расходомер
 0–30 г/с
 ±0.1%

 Датчик растворенного кислорода
 6 ppb-насыщение^a
 ±1%

Таблица 2. Диапазон измерения растворенного кислорода и точность приборов

^а ppb – одна миллиардная часть величины (parts per billion) или 10⁻⁹ значения величины.

топливе измеряли полярографическим методом с использованием датчика растворенного кислорода (InPro 6850i, Mettler-Toledo). Эталонный электрод кислородного датчика соответствует обычному аноду серебро/хлорид серебра. Анод представляет собой платиновый электрод и отделен от эталона. Катод сделан в виде платинового кольца, а электролит представляет собой раствор хлорида калия. Кислород диффундирует через пленку растворенного кислорода и восстанавливается на катоде. Измеренный ток восстановления пропорционален парциальному давлению кислорода в топливе. Концентрация растворенного кислорода – средний результат после смешивания топлива в трубке 10 за определенный период времени сбора пробы. Диапазон измерения и точность устройств указаны в табл. 2.

Перед экспериментом N_2 барботируют через всю систему в герметичный топливный бак для удаления воздуха. После этого при включенной магнитной мешалке определяют количество растворенного кислорода в топливе, которое будет постепенно уменьшаться с 70 ppm до необходимой концентрации. После опыта отработанное топливо проходит через систему быстрого охлаждения водой и собирается в специальном резервуаре. Трубка обернута теплоизоляционным материалом (кварцевым волокном) для уменьшения потерь тепла.

Для изучения потребления растворенного кислорода вдоль трубки была принята экспериментальная стратегия изменения длины нагреваемой части трубки при постоянном токе нагрева [22-23]. Верхний предел диапазона измерения температуры датчика растворенного кислорода составляет 80°С. Следовательно, перед измерением необходимо снизить температуру топлива. Поскольку в охлаждаемой трубке может образоваться большое количество отложений [24], была использована система быстрого охлаждения с теплообменником типа «труба в трубе», как показано на рис. 2. В этой системе топливо из испытательной трубки быстро охлаждается путем прямого смешивания с охлаждающим топливом без растворенного кислорода из герметичного топливного резервуара. Это смешанное топливо (смесь высокотемпературного и охлаждающего топлив) дополнительно охлаждается водой, протекающей через кольцевое пространство теплообменника. Охлажденное смешанное топливо собирают в так называемом сборном топливном резервуаре и датчиком измеряют в нем количество растворенного кислорода.

Для проводимого эксперимента в системе было установлено давление 3.5 МПа, температура на выходе топлива поддерживалась постоянной на уровне 450°С, а массовый расход топлива составлял 1.08 г/с. Эксперименты по закоксовыванию



Рис. 2. Система быстрого охлаждения.



Рис. 3. Распределение количества локального кокса по нагретой трубке для двух групп экспериментов.

при термическом окислении проводили в течение 2 ч с изменением начальной концентрации растворенного кислорода примерно от 0 до 70 ррт. Температура топлива на выходе и время реакции при постоянном тепловом потоке 165.4 кВт/м² приведены в «Дополнительном материале № 1». Когда скорости потока охлаждающей воды и охлаждаюшего топлива составляли соответственно 79.50 и 5.40 г/с, топливо охлаждали примерно до 25°С (с помощью системы быстрого охлаждения). Таким образом, время пребывания топлива в теплообменнике «труба в трубе» составляло около 5% от времени пребывания в нагревательной трубке и, следовательно, потребление растворенного кислорода во время процесса охлаждения могло быть незначительным. Изменение температуры топлива и времени пребывания вдоль трубки приведены в «Дополнительном материале № 2».

Концентрация растворенного кислорода в топливе с высокой температурой вдоль трубки может быть вычислена с помощью уравнения (1):

$$[O_2]_{\rm H} = \frac{\dot{m}_{\rm H} + \dot{m}_{\rm C}}{\dot{m}_{\rm H}} [O_2]_{\rm B}, \tag{1}$$

где $[O_2]_H$ и $[O_2]_B$ – концентрации растворенного кислорода в высокотемпературном и смешанном топливе, соответственно; \dot{m}_H и \dot{m}_C – массовый расход высокотемпературного и охлаждающего

НЕФТЕХИМИЯ том 61 № 6 2021

топлив, соответственно. Основываясь на точности приборов (табл. 2), погрешность косвенного измерения при определении [O₂]_н была оценена в 6.1%.

Определение количества и морфологии кокса. Для количественной оценки поверхностных отложений был использован метод выгорания углерода. Сначала трубку разрезали на небольшие сегменты, длину каждого сегмента точно измеряли штангенциркулем. Затем сегменты сушили в вакууме при 100°С в течение 1 ч. Наконец, после того, как кокс прореагировал с кислородом и превратился в CO₂ при высокой температуре (800°C), количество углерода можно определить косвенно с помощью инфракрасного анализатора диоксида vглерода с точностью до 0.01 мг. Общее количество кокса (М) представляет собой сумму количеств кокса всех небольших сегментов трубки. Погрешность общего количества кокса (ΔM) была оценена в ±0.045 мг по уравнению (2):

$$\Delta M = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} (\Delta m_i)^2},$$
(2)

где *i* представляет номер сегмента; Δm_i – погрешность количества кокса каждого сегмента.

Морфология поверхности и элементный анализ отложений кокса были охарактеризованы с помощью сканирующей электронной микроскопии с энергодисперсионной рентгеновской спектроскопией (СЭМ с ЭДС, Hitachi S-4800). После того, как сегменты трубки были высушены в вакууме при 100°С в течение 1 ч, одна сторона сегмента была отшлифована до тех пор, пока внутренняя стенка другой стороны полностью не обнажилась. Следует отметить, что в процессе шлифования внешняя стенка сегмента охлаждалась водой. Затем может быть проведен анализ СЭМ/ЭДС.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Воспроизводимость результатов. Экспериментальная надежность термического окисления кокса может быть продемонстрирована с помощью двух серий экспериментов с различными длинами нагреваемых трубок. На рис. 3 показано распределение локального кокса по нагретой трубке. Результаты каждой группы экспериментов при одинаковых рабочих условиях хорошо согласуются. Так,



Рис. 4. Общее количество кокса при различных исходных концентрациях растворенного кислорода.

например, для группы 2 максимальная разница в количестве локального кокса по длине трубки составляет 0.075 мг/см², а относительное отклонение общего количества коксования составляет 4.42.

Влияние исходной концентрации растворенного кислорода. Зависимость количества отложений кокса от концентрации растворенного кислорода при термическом окислении представлено на рис. 4–7. Как показано на рис. 4, при снижении начальной концентрации растворенного кислорода с 70.0 до 22.4 ppm (и почти до 0 ppm) общее количество кокса снизилось на 47.6 и 75.4%: с 6.26 до 3.28 мг и 1.54 мг. Результаты показывают, что снижение начальной концентрации растворенного кислорода может замедлить процесс осаждения.

В табл. З представлен механизм термического окислительного коксования авиационного кероси-

на [25]. В процессе автоокисления жидкого углеводородного топлива растворенный кислород (O₂) реагирует с углеводородным топливом (RH) или свободным радикалом (R[·]) с образованием свободных радикалов гидропероксида (RO₂). Затем частицы гидропероксида (RO₂H) в жидком углеводороде инициируют цикл термического автоокисления, который в конечном итоге, после серии реакций, приводит к термически окисленному закоксовыванию. Следовательно, исходная концентрация растворенного кислорода определяет количество гидропероксидов, что дополнительно влияет на количество отложений кокса при термическом окислении. Однако термически окисленный кокс не удаляется полностью, когда он находится в почти нулевом состоянии, и это явление можно объяснить самопроизвольной реакцией гидропероксидов по другому механизму [12].

Распределение количества кокса вдоль трубки при различных начальных концентрациях растворенного кислорода показано на рис. 5. Видно, что меньшая начальная концентрация растворенного кислорода приводит к меньшему количеству кокса при термическом окислении. При отсутствии растворенного кислорода поверхностное осаждение было незначительным по всей длине трубки по сравнению с двумя другими условиями, без пика возле входа или выхода трубки.

На рис. 6 представлены СЭМ-изображения термически окисленного кокса при осевом поло-

\mathcal{N}_{2}	Реакция	N⁰	Реакция		
1	$RH \rightarrow R' + H'$	11	$RO' + RO' \rightarrow ROH + R = O_{aldehyde}$		
2	$RH + O_2 \rightarrow R' + HOO'$	12	$RO' + RO' \rightarrow RO_2 H + R = O_{ketone}$		
3	$\mathrm{RO}_2 \mathrm{H} \rightarrow \mathrm{RO}^{\cdot} + \mathrm{OH}^{\cdot}$	13	$RO_2^{\cdot} + RO_2^{\cdot} \rightarrow ROOOOR$		
4	$R' + O_2 \rightarrow RO_2'$	14	$ROOOOR \rightarrow RO' + RO' + O_2$		
5	$\mathrm{RO}_2^{\cdot} + \mathrm{RH} \rightarrow \mathrm{RO}_2 \mathrm{H} + \mathrm{R}^{\cdot}$	15	$RO' + R' \rightarrow RH + R = O_{ketone}$		
6	$\mathrm{RO}_{2}\mathrm{H} + \mathrm{RO}_{2}\mathrm{H} \rightarrow \mathrm{RO}^{\cdot} + \mathrm{RO}^{\cdot}_{2} + \mathrm{H}_{2}\mathrm{O}$	16	$RO' + R' \rightarrow RH + R = O_{aldehyde}$		
7	$OH' + RH \rightarrow H_2O + R'$	17	$RO' + RO' \rightarrow ROOR$		
8	$RO' + RH \rightarrow ROH + R'$	18	$RO' + R' \rightarrow ROR$		
9	$RO' \rightarrow Rprime' + R = O_{ketone}$	19	$R' + R' \rightarrow R_2$		
10	Rprime + RH \rightarrow alkane + R	20	$RO_2^{\cdot} \rightarrow R^{\cdot} + O_2$		

Таблица 3. Механизм термического окислительного коксования авиационного керосина [25]

жении x = 40-45 см на внутренней поверхности трубки. Как показано на рис. 6, отложения кокса имеют в основном аморфную хлопьевидную форму, соответствующую начальным концентрациям растворенного кислорода 22.4 и 70 ррт. По мере увеличения начальной концентрации растворенного кислорода диаметр частиц кокса увеличивается. Кроме того, распределение коксовых отложений более компактное и равномерное. Однако в условиях кислородного голодания морфология кокса отличается от игольчатой структуры, что находится в согласии с работой [17].

Ингибирующий эффект деоксигенации топлива на закоксовывание при термическом окислении может быть дополнительно прояснен с точки зрения элементного анализа осажденных поверхностей при различных начальных концентрациях растворенного кислорода, выполненного по результатам энергодисперсионной системы (ЭДС), как указано в табл. 4.

Во всех трех случаях углерод составляет наибольшую долю. При насыщенном исходном растворенном кислороде количество углерода составляет 88.08%, тогда как эта величина составляет только 65.25% при начальной концентрации 22.4 ppm и 49.57% при почти нулевом исходном растворенном кислороде. Напротив, количество металлических элементов, таких как Fe, Cr и Ni, постепенно увеличивается с уменьшением объема растворенного кислорода; это означает более низкую степень покрытия отложений кокса на внутренней поверхности трубки, что дополнительно подтверждает ингибирующий эффект снижения исходной концентрации растворенного кислорода на осаждение углерода.



Рис. 5. Распределение количества кокса по длине трубки при различных исходных концентрациях растворенного кислорода.

Распределение температуры топлива и концентрации растворенного кислорода по длине трубки. Для дальнейшего изучения взаимосвязи количества кокса при термическом окислении и растворенного кислорода были измерены осевые изменения температуры топлива и концентрации растворенного кислорода вдоль трубки, что также являлось показателем потребления растворенного кислорода во время процесса реакции. Профили температуры топлива, температуры стенки и концентрации растворенного кислорода показаны на рис. 7 и 8.

Ранее на рис. 5 показано, что с введением насыщенного исходного растворенного кислорода происходит выброс количества кокса на входе в



Рис. 6. СЭМ-изображения отложения кокса при различных исходных концентрациях растворенного кислорода.

НЕФТЕХИМИЯ том 61 № 6 2021

QIN HUANG и др.

	Атомный процент элементов, %				
пачальная концентрация растворенного кислорода, ррш	С	Cr	Fe	Ni	
70	49.57	11.23	35.47	3.73	
22.4	65.25	15.44	19.31	0	
около О	88.08	4.96	6.18	0.78	

Таблица 4. Элементный состав коксовых отложений при различных исходных концентрациях растворенного кислорода по результатам ЭДС

трубку, а затем появляется первый пик. Это явление также наблюдалось в других исследованиях [6, 21], что можно объяснить взаимодействием большого градиента температуры и изменения пограничного слоя на входе. Как показано на рис. 7, по длине трубки повышаются как температура стенки, так и температура жидкости. Температура стенок у входа намного ниже, чем у средней и задней части трубки, но она быстро увеличивается от 50°С до примерно 400°С при $x \approx 20$ см с гораздо бо́льшим температурным градиентом. Кроме того, достаточное количество растворенного кислорода также способствует образованию термически окисленнного кокса.

Из рис. 8 видно, что концентрация растворенного кислорода имеет тенденцию к снижению вдоль трубки. От входа до осевого положения около 20 см концентрация растворенного кислорода снижается с 70 ppm (насыщенный) до примерно 60 ppm при относительно низком расходе. Однако

концентрация растворенного кислорода начинает резко падать через 20 см, и особенно при x = 40-50 см она снижается с 39.3 ррт до 4.5 ррт. После этого концентрация растворенного кислорода остается на низком уровне до тех пор, пока он полностью не израсходуется на выходе. Как показано на рис. 7, $T_{\text{стенки}}$ достигает 400°С примерно при x =20 см, и поэтому относительно высокая Т_{стенки} может привести к быстрому потреблению растворенного кислорода. Хотя растворенный кислород почти исчерпан, прекурсоры кокса из поступающего потока не полностью расходуются и продолжают участвовать в реакции коксования, когда топливо течет по трубке. Кроме того, более высокая температура стенок и температура топлива на выходе также могут способствовать отложению кокса. Следовательно, небольшой пик появляется примерно в 80 см от выхода трубки, как показано на рис. 5. Можно обнаружить, что быстрое увеличение количества коксования на входе может быть связано с



Рис. 7. Профили температуры основного топлива и температуры стенки вдоль трубы.



Рис. 8. Профиль концентрации растворенного кислорода вдоль трубки.

НЕФТЕХИМИЯ том 61 № 6 2021

906

большим градиентом температуры и достаточным количеством растворенного кислорода, в то время как на выходе это в основном связано с прекурсорами кокса, образующимися на входе, а также с высокой температурой стенки и температурой топлива. Чувствительность коксования к концентрации растворенного кислорода и температуре различна на разных стадиях.

Таким образом, в работе была использована экспериментальная установка для термического окисления кокса китайского авиационного керосина RP-3 с системой деоксигенации и поточной системой измерения. Были изучены термически окисленный кокс при различных начальных концентрациях растворенного кислорода, а также распределения температуры стенки, температуры топлива и концентрации растворенного кислорода вдоль электрически нагреваемой трубки.

Результаты показывают, что снижение начальной концентрации растворенного кислорода в топливе может эффективно ингибировать образование отложений термически окисленного кокса. Морфология поверхности кокса состоит в основном из аморфных хлопьевидных частиц, но в условиях кислородного голодания большое количество кокса игольчатой формы. Кроме того, диаметр частиц и содержание углерода в отложениях кокса становятся больше при более высокой начальной концентрации растворенного кислорода. Результаты измерений показывают, что концентрация растворенного кислорода нелинейно уменьшается вдоль трубки, в то время как температура стенок и температура топлива повышаются, но с разной скоростью. Чувствительность термически окисленного кокса к концентрации растворенного кислорода и температуре различна в разных осевых положениях трубки. Количество кокса на входе в трубку увеличивается из-за большого температурного градиента и достаточного количества растворенного кислорода, в то время как образование термически окисленного кокса на выходе в основном связано с прекурсорами кокса, образующимися на входе в трубку, и высокой температурой стенки и температурой топлива.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Qin Huang, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6075-6681

НЕФТЕХИМИЯ том 61 № 6 2021

Yu Chen, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7145-3873

Zewei Bao, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1684-7260

Quan Zhu, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5280-0320

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа поддержана Национальным фондом естественных наук Китая (грант № 91641121).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Bruening G.B., Chang W.S. Cooled cooling air systems for turbine thermal management. In: ASME 1999 Int. Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exhibition, Indianapolis, 1999. https://doi.org/10.1115/99-GT-014
- Maurice L.Q., Lander H., Edwards T., Harrison W.E. Advanced aviation fuels: a look ahead via a historical perspective // Fuel. 2001. V. 80. P. 747–756. https://doi. org/10.1016/S0016-2361(00)00142-3
- Venkataraman R., Eser S. Characterization of solid deposits from the thermal-oxidative degradation of jet fuel // Int. J. Oil, Gas Coal Technol. 2008. V. 1, P. 126–137. https://doi.org/10.1504/IJOGCT.2008.016735
- Parks C.M., Alborzi E., Blakey S.G., Meijer A.J.H.M., Pourkashanian M. Density functional theory calculations on copper-mediated peroxide decomposition reactions: implications for jet fuel autoxidation // Energy Fuels. 2020. V. 34. P. 7439–7447. https://doi.org/10.1021/acs. energyfuels.0c00918
- Mi J., Ye D., Dai Y., Xie H., Wu D., Sun H., Guo Y., Fang W. Strategically designed macromolecules as additives for high energy-density hydrocarbon fuels // Fuel. 2020. V. 270. P. 117433. https://doi.org/10.1016/j. fuel.2020.117433
- He M., Zhang Q., Liu X. Fouling formed on SS316L tube surface from thermal oxidative degradation of exotetrahydrodicyclopentadiene // Appl. Therm. Eng. 2017. V. 118. P. 464–470. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.02.118
- Fu Y., Wen J., Tao Z., Xu G., Huang H. Surface coking deposition influences on flow and heat transfer of supercritical hydrocarbon fuel in helical tubes // Exp.

Therm. Fluid Sci. 2017. V. 85. P. 257–265. https://doi. org/10.1016/j.expthermflusci.2017.03.016

- Fu Y., Xu G., Wen J., Huang H. Thermal oxidation coking of aviation kerosene RP-3 at supercritical pressure in helical tubes // Appl. Therm. Eng. 2018. V. 128. P. 1186–1195. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.09.101
- Zhao L., Liu J., Zhang X. Influencing factors of autoxidation kinetics parameters of endothermic hydrocarbon fuels // Energy Fuels. 2019. V. 33. P. 8101–8109. https:// doi.org/10.1021/acs.energyfuels.9b01506
- Alborzi E., Blakey S., Ghadbeigi H., Pinna C. Prediction of growth of jet fuel autoxidative deposits at inner surface of a replicated jet engine burner feed arm // Fuel. 2018. V. 214. P. 528–537. https://doi.org/10.1016/j. fuel.2017.10.006
- Alborzi E., Parks C.M., Gadsby P., Sheikhansari A., Blakey S.G., Pourkashanian M. Effect of reactive sulfur removal by activated carbon on aviation fuel thermal stability // Energy Fuels. 2020. V. 34. P. 6780–6790. https:// doi.org/10.1021/acs.energyfuels.9b04370
- Alborzi E., Gadsby P., Ismail M.S., Sheikhansari A., Dwyer M.R., Meijer A.J.H.M., Blakey S.G., Pourkashanian M. Comparative study of the effect of fuel deoxygenation and polar species removal on jet fuel surface deposition // Energy Fuels. 2019. V. 33. P. 1825–1836. https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.8b03468
- Liu Z., Tang S., Li Z., Qin Z., Yuan S., Wang L., Wang L., Zhang X., Liu G. An improved kinetic model for deposition by thermal oxidation of aviation hydrocarbon fuels // Fuel. 2019. V. 258. P. 116–139. https://doi.org/10.1016/j. fuel.2019.116139
- Zhu K., Tao Z., Xu G., Jia Z. Surface deposition characteristics of supercritical kerosene RP-3 fuel within treated and untreated stainless-steel tubes. Part 1: Short thermal duration // Energy Fuels. 2016. V. 30. P. 2687– 2693. https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.5b02889
- Qin Z., Liu Z., Wang L., Zhang X., Fu Y., Xu G., Liu G. Synthesis and performance of a series of polyisobutylene-substituted succinic acid ester dispersants for reducing thermal oxidation deposition of jet fuel // Energy Fuels. 2020. V. 34. P. 5634–640. https://doi.org/10.1021/ acs.energyfuels.0c00230

- Ervin J.S., Williams T.F. Dissolved oxygen concentration and jet fuel deposition // Ind. Eng. Chem. Res. 1996. V. 35ю P. 899–904. https://doi.org/10.1021/ie950378j
- Roan M.A., Boehman A.L. The effect of fuel composition and dissolved oxygen on deposit formation from potential JP-900 basestocks // Energy Fuels. 2004. V. 18. P. 835–843. https://doi.org/10.1021/ef034050b
- Zabarnick S., Zelesnik P., Grinstead R.R. Jet fuel deposition and oxidation: dilution, materials, oxygen, and temperature effects // J. Eng. Gas Turb. Power. 1996. V. 118. P. 271–277. https://doi.org/10.1115/1.2816588
- Spadaccini L.J., Huang H. On-line fuel deoxygenation for coke suppression // J. Eng. Gas Turb. Power. 2003. V. 125. P. 369–377. https://doi.org/10.1115/1.1582497
- 20. *Heneghan S.P., Zabarnick S.* Oxidation of jet fuels and the formation of deposit // Fuel. 1994. V. 73 P. 35–43. https://doi.org/10.1016/0016-2361(94)90185-6
- Pei X., Hou L. Effect of dissolved oxygen concentration on coke deposition of kerosene // Fuel Process Technol. 2016. V. 142. P. 86–91. https://doi.org/10.1016/j. fuproc.2015.09.029
- 22. Jiang R., Liu G., Zhang X. Thermal cracking of hydrocarbon aviation fuels in regenerative cooling microchannels // Energy Fuels. 2013. V. 27. P. 2563–2577. https:// doi.org/10.1021/ef400367n
- Liu P., Zhang T., Zhou L., Chen Z., Li X. Experimental and numerical analysis on flow characteristics and pyrolysis mechanism of hydrocarbon fuel with a novel online hybrid method // Energ. Convers. Manage. 2019. V. 198. P. 111817. https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2015.09.029
- Ervin J.S., Williams T.F., Katta V.R. Global kinetic modeling of aviation fuel fouling in cooled regions in a flowing system // Ind. Eng. Chem. Res. 1996. V. 35. P. 4028–4036. https://doi.org/10.1021/ie960220e
- Alborzi E., Dwyer M.R., Parks C.M., Sheikhansari A., Mielczarek D.C., Zanganeh M., Meijer A.J.H.M., Blakey S.G., Pourkashanian M. Construction of a reduced chemical kinetic mechanism for autoxidation of *n*-paraffinic solvent – A model for aviation fuel // Fuel. 2021. V. 294. P. 120170. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.120170

908