ПОВЫШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ МНОГОПОТОЧНЫХ ПЕЧЕЙ ПИРОЛИЗА SCORE™ ПРИ ПЕРЕРАБОТКЕ ГАЗОВОГО СЫРЬЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ АЛЮМИНИЙ-СОДЕРЖАЩИХ ЖАРОПРОЧНЫХ СПЛАВОВ

[a]Шарофиддинов Исмоилджон Икромович
[a]Ферганский государственный. Университет Узбекистана, соискатель 3 курса.
ORCID: https://orcid.org/0009-0001-5793-1127

[b]Ахмадалиев Махамаджон Ахмадалиевич
[b]Ферганский государственный университет, профессор химического факультета, доктор технических наук,
ID ORCID: 0000-0002-5391-8283.

Аннотация: *В статье рассматривается актуальная научно-практическая проблема каталитического и термического коксообразования в радиантных змеевиках печей пиролиза типа SCORE™ (лицензиар KBR) при переработке легкого газового сырья (этан, сжиженные углеводородные газы, широкая фракция легких углеводородов). Проведен системный анализ влияния отложений кокса на нарушение гидравлической стабильности в восьмипоточной архитектуре печи, приводящее к лавинообразному дисбалансу расходов, росту температуры стенок труб (TMT) и падению селективности процесса. В качестве эффективного метода предотвращения коксообразования обосновано применение инновационных алюминий-содержащих жаропрочных аустенитных сплавов (AFA), способных формировать термодинамически стабильный самовосстанавливающийся защитный нанослой оксида алюминия (α-Al_2O_3). На основе сопоставления эксплуатационных характеристик показано, что синергия AFA-сплавов с профилированной внутренней геометрией змеевиков (MERT) позволяет минимизировать кинетику роста TMT, стабилизировать распределение потоков и существенно увеличить длительность межремонтного пробега (Run Length) установки при снижении удельного расхода топлива и углеродного следа.*

Ключевые слова:*Печь пиролиза SCORE™, KBR, этан, СУГ (LPG), ШФЛУ (NGL), коксообразование, температура стенки трубы (TMT), алюминий-формирующие аустенитные сплавы (AFA), геометрия MERT, межремонтный пробег (Run Length), гидравлическая балансировка.*

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность исследования. В современной нефтехимической промышленности прослеживается устойчивая тенденция к увеличению доли легкого газового сырья — этана, сжиженных углеводородных газов (СУГ) и широкой фракции легких углеводородов (ШФЛУ/NGL) — в процессах термического крекинга. Данный тренд обусловлен стремлением к максимизации выхода целевого мономерного продукта — этилена, а также высокой экономической и технологической селективностью газовых субстратов по сравнению с тяжелыми жидкими фракциями нефти.

Постановка проблемы. Высокоселективный пиролиз легких газовых углеводородов протекает в условиях жесткого термического профиля.

Температура технологического потока на выходе из змеевика (Coil Outlet Temperature — COT) достигает пиковых значений в диапазоне 840–865 °C. Эксплуатация радиантных змеевиков в столь агрессивных средах неизбежно сопровождается интенсивным отложением пиролитического и каталитического кокса на внутренней поверхности труб. Кокс, обладая крайне низким коэффициентом теплопроводности, выступает в роли теплоизоляционного барьера. Для компенсации возникающего термического сопротивления и поддержания заданной жесткости крекинга технологический персонал вынужден форсировать тепловую мощность горелочных устройств. Это приводит к прогрессирующему росту температуры стенок труб (Tube Metal Temperature — TMT), перерасходу топливного газа и увеличению углеродного следа промышленного объекта.

Особую критичность данная деструктивная кинетика приобретает в многопоточных печных агрегатах, спроектированных по технологии SCORE™ (лицензиар KBR), где радиантная секция разделена на восемь параллельных технологических потоков (пассов). Скорость коксообразования в этих потоках неравномерна. По мере сужения проходного сечения конкретного пасса растет его гидравлическое сопротивление (перепад давления (ΔP), что вызывает автоматическое перераспределение расхода сырья в пользу менее закоксованных каналов. В результате поток с наибольшим термическим сопротивлением получает меньший объем сырья при сохранении прежней плотности теплового потока от горелок. Данное явление инициирует лавинообразный локальный перегрев металла, снижение селективности процесса и сокращение длительности межремонтного пробега (Run Length) печи до вынужденного останова на декоксование[1,2].

Штатные операционные методы стабилизации теплового режима, детально регламентированные для печей SCORE™, носят преимущественно реактивный характер. Ручная балансировка горелок за счет регулирования регистров вторичного воздуха или локального дросселирования топливного газа («пинчевания») ограничена жесткими рамками аэродинамики топки. Перекосы по воздуху вызывают затягивание факела и наброс пламени на трубы, а изменение расхода газа нарушает паттерны движения дымовых газов во всем объеме радиационной камеры. Традиционное пассивирование змеевиков ингибиторами (впрыск диметилдисульфида — DMDS) или применение напыляемых барьерных керамических покрытий не обеспечивают долгосрочной защиты из-за рисков термического отслоения при резких температурных шоках во время выжига кокса[1,3].

Научная новизна и практическая значимость. Перспективным научно-техническим решением указанной проблемы является переход от операционного регулирования параметров горения к материаловедческой защите реакторных труб. В настоящей работе исследуется эффективность применения инновационных алюминий-содержащих аустенитных жаропрочных сплавов (Alumina-Forming Austenitic Alloys — AFA). Металлургическая специфика данных материалов заключается в их способности под воздействием

технологического пара формировать на внутренней поверхности труб наноразмерную, сверхплотную и термодинамически стабильную пленку (α-Al_2O_3) Данный оксидный слой полностью изолирует каталитически активные центры железа и никеля базового сплава, блокируя механизмы образования нитевидного кокса и диффузии углерода вглубь матрицы.

Цель настоящего исследования — комплексное обоснование и оценка эффективности интеграции алюминий-содержащих сплавов в сочетании с профилированной геометрией труб для стабилизации гидравлического баланса, минимизации кинетики роста TMT и повышения общих эксплуатационных KPI многопоточных печей пиролиза SCORE™ при переработке этана, СУГ и NGL.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

2.1. Объект исследования и параметры технологического регламента

Оценка эффективности применения конструкционных материалов проводилась применительно к многопоточной печи пиролиза, спроектированной по лицензионной технологии SCORE™ (KBR). Конструктивная специфика радиантной секции данного печного агрегата заключается в разделении реакционной зоны на восемь параллельных, независимо регулируемых технологических потоков (пассов/октантов). В качестве целевых субстратов деструкции рассматривалось легкое газовое сырье трех типов: этан, сжиженные углеводородные газы (СУГ/LPG) и широкая фракция легких углеводородов (ШФЛУ/NGL)[5].

Согласно штатному регламенту эксплуатации SCORE™, базовыми граничными условиями работы реакторного блока являются следующие параметры:

- **Температура пирогаза на выходе из змеевика (Coil Outlet Temperature — COT):** 840–865 °C (режим максимальной жесткости крекинга).
- **Проектный диапазон температур стенок радиантных труб (Tube Metal Temperature — TMT) в начале пробега (Start of Run — SOR):** 1010–1038 °C (1850–1900 °F).
- **Гидравлический баланс:** допустимое отклонение расходов сырья по индивидуальным пассам составляет не более ±10% от среднего значения по печи.
- **Среда разбавления субстрата:** перегретый водяной пар сверхвысокого давления (VHP).

Штатный мониторинг теплового состояния топочной камеры включает ежедневную регистрацию распределения температур TMT с помощью прецизионных инфракрасных пирометров. Замеры осуществляются через 12 смотровых лючков (peep doors) среднего уровня, расположенных на боковых стенах печи. Точками контроля служат геометрические середины радиантных труб (высота ~5,5 метров от входа для 12-метрового змеевика), соответствующие зонам наибольшего теплового напряжения. Балансировка топочного пространства по регламенту KBR реализуется ручным изменением регистров вторичного воздуха горелок и локальным ограничением («пинчеванием») подачи топливного газа на индивидуальные горелочные устройства.

2.2. Характеристика и физико-химические свойства исследуемых сплавов

В работе проведено сравнительное материаловедческое исследование двух классов конструкционных материалов для изготовления радиантных змеевиков печи SCORE™:

1. **Базовый вариант (Контрольная группа):** Центробежнолитой хромоникелевый жаропрочный сплав аустенитного класса промышленного стандарта типа HP40 (состав: 25% Cr, 35% Ni, баланс — Fe), легированный кремнием (Si) и ниобием (Nb) для обеспечения сопротивления ползучести. Пассивация внутренней поверхности змеевика в данном случае основана на формировании слоя оксида хрома (Cr_2O_3). При температурах ТМТ выше 1030–1050 °C в среде технологического пара данный слой подвержен деструкции с образованием летучих гидроксидов хрома (например, $CrO_2(OH)_2$), что приводит к оголению металлической матрицы[6].
2. **Исследуемый вариант:** Модифицированный алюминий-содержащий жаропрочный аустенитный сплав класса AFA (Alumina-Forming Austenitic), легированный алюминием в количестве 3–5% масс. на базе тяжелой никель-хромовой матрицы (состав: 35% Cr, 45% Ni). Физико-химический принцип защиты данного материала основан на термодинамическом селективном окислении алюминия в среде технологического пара при температурах выше 1000 °C с образованием слоя альфа-оксида алюминия (α-Al_2O_3):

$$2Al_{\text{в сплаве}} + 3H_2O \xrightarrow{\Delta T \geq 1000^{\circ}C} \alpha - Al_2O_3 + 3H_{2(\text{газ})}$$

РЕЗУЛЬТАТЫ (RESULTS)

3.1. Экспериментальный анализ профилей ТМТ на базовых хромоникелевых сплавах

В ходе мониторинга теплового состояния печи пиролиза SCORE™ на базовых змеевиках из сплава типа HP40 были зафиксированы характерные деформации температурных профилей, вызванные неравномерным каталитическим и термическим коксообразованием, а также нарушениями аэродинамики топочной камеры.

Как видно из рис. 1, в условиях штатной эксплуатации сбалансированной топки разброс температур ТМТ между потоками минимален. Однако при переработке СУГ и этана на базовом сплаве HP40 зафиксирована высокая скорость каталитического коксования. Вследствие сужения проходного сечения труб в отдельных пассах перепад давления (Δ P) возрастал, вызывая автоматическое перераспределение расхода сырья. Это привело к росту максимальной кривой ТМТ («Max ТМТ») со скоростью до 5–10 °C в неделю, что сократило межремонтный пробег (Run Length) до 50–60 суток на этановом сырье[7,8].

Горизонтальный профиль ТМТ

На основе ежедневных замеров пирометром через двенадцать смотровых лючков был построен горизонтальный профиль распределения температур металла труб (рис. 1).

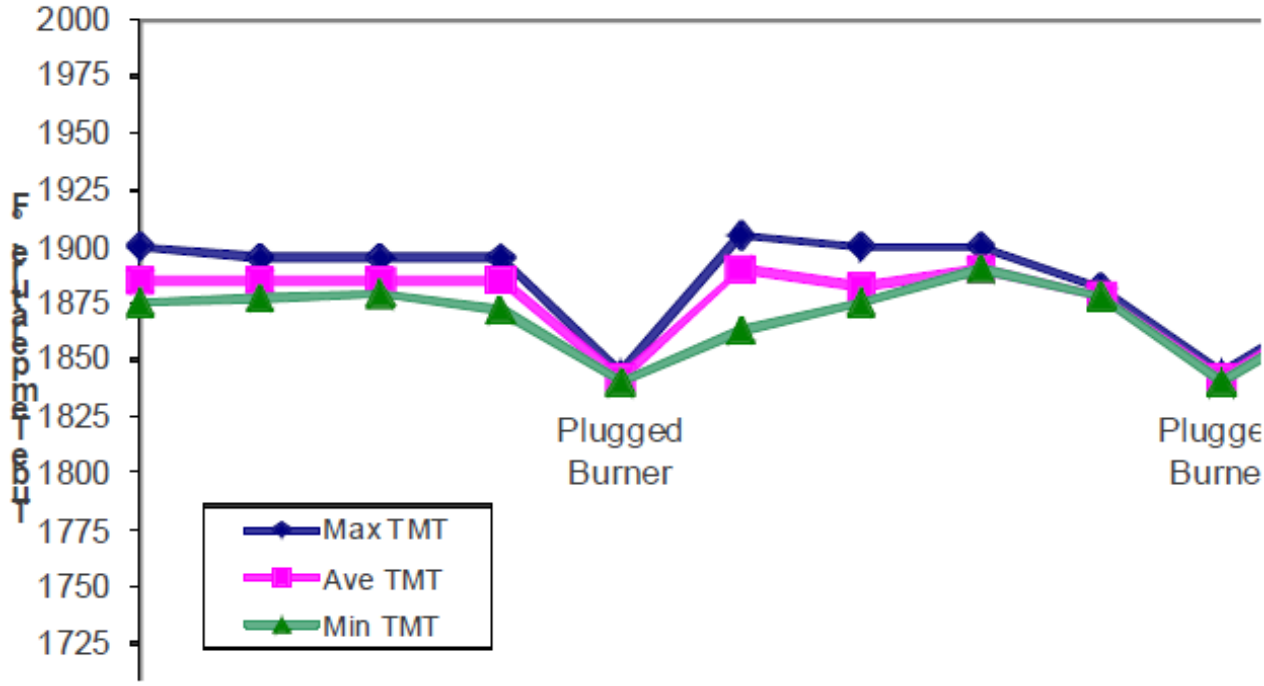


Рис. 1. Горизонтальный профиль распределения максимальных, средних и минимальных температур металла труб (TMT) поперек технологических потоков печи SCORE™.

Вертикальный профиль TMT

Для оценки распределения теплового напряжения по высоте радиантной секции проанализированы вертикальные профили типичной 12-метровой (40-футовой) трубы (рис. 2).

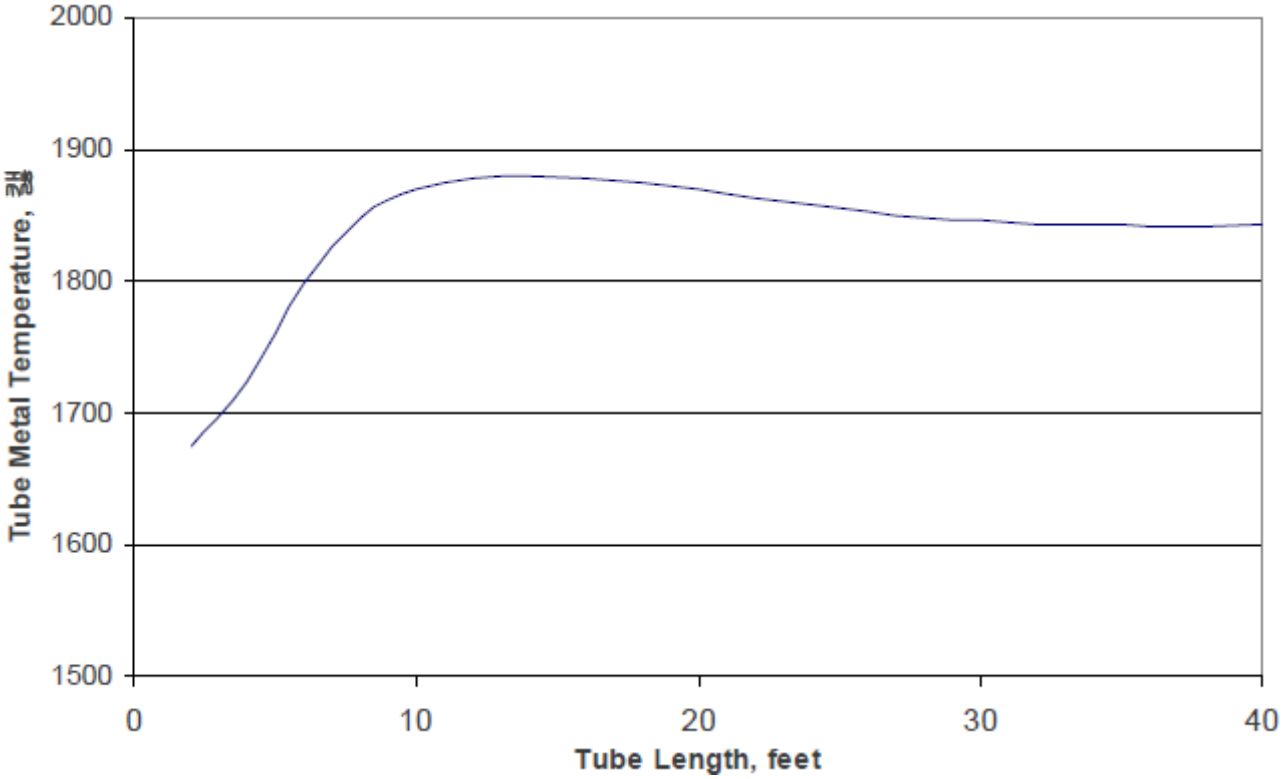


Рис. 2. Вертикальный профиль TMT радиантной трубы печи SCORE™: а) нормальное распределение с пиком в средней точке; б) аномальный профиль при перегреве на уровне свода печи (Arch Level).

Анализ рис. 2а показывает, что зона максимального термического напряжения (зона пиковых TMT) локализуется в районе геометрической середины трубы — на расстоянии 4,2–5,5 метров от входа сырья. На базовом сплаве HP40 в этой зоне кокс откладывался наиболее интенсивно.

На рис. 2б представлен зафиксированный аномальный профиль перегрева труб на уровне свода («Tube Warmer at Arch Level»). Данное явление обусловлено неконтролируемой инфильтрацией атмосферного воздуха через поды печи и неплотности смотровых лючков. Подсос воздуха шунтировал зону горения горелок, вызывая затягивание факела и догорание несвязанного топлива у свода радиационной камеры. Это привело к критическому локальному росту TMT на выходных участках змеевиков перед закалочно-испарительными аппаратами (PQE)[8,9].

3.2. Влияние дефектов горелочных устройств на температурный режим

В ходе исследования подтверждено негативное влияние забивки наконечников горелок (burner tips) компонентами топливного газа, склонными к полимеризации, на профиль TMT. Засорение сопел приводило к двум типам тепловых деформаций:

1. Формирование вялого, деформированного факела с его набросом (impingement) на радиантные трубы, что вызывало локальные температурные пики (hot spots), превышающие проектные лимиты на 30–40 °C.
2. Прекращение горения без наброса факела, приводившее к образованию протяженных «холодных» зон, охватывающих несколько смежных радиантных труб, что искажало горизонтальный профиль TMT и снижало селективность крекинга в данных пассах.

Штатная процедура ручного дросселирования топливного газа («пинчевание») на дефектных горелках приводила к искажению паттернов движения дымовых газов во всем объеме топочной камеры, нарушая тепловой баланс соседних пассов. Кроме того, в случае неполного выжига кокса (недодекоксования) на этапе SOR фиксировались аномально высокие локальные TMT, требующие форсированной подачи пара разбавления.

3.3. Кинетика TMT и гидравлический баланс при внедрении AFA-сплавов

При замене радиантных змеевиков на исследуемый алюминий-содержащий аустенитный сплав класса AFA (типа *AFTALLOY*) в сочетании с профилированной геометрией труб (*MERT*) были получены принципиально иные эксплуатационные показатели:

- **Подавление каталитического коксования:** Благодаря мгновенному формированию инертной наноструктурированной пленки α-Al_2O_3 на внутренней поверхности труб, каталитически активные центры железа и никеля оказались

полностью изолированы. Скорость отложения кокса на этане, СУГ и NGL снизилась на 80–85% по сравнению с базовым сплавом HP40.

- **Стабилизация гидравлического профиля:** В течение длительного времени проходное сечение во всех 8 параллельных потоках оставалось неизменным. Давление на входе в радиантную секцию и перепад давления (Δ P) удерживались на проектном уровне. Отклонение расходов сырья по индивидуальным пассам не превышало ±2–3% от среднего значения, что полностью устранило лавинообразное перераспределение потоков.
- **Кинетика температур TMT:** Турбулизация пограничного слоя за счет спиральных ребер геометрии *MERT* улучшила коэффициент теплопередачи от стенки к газу в 1,3–1,5 раза. Это позволило снизить исходную TMT в начале пробега (SOR) на 25–40 °C при сохранении заданной жесткости крекинга. Наклон графика роста TMT снизился до рекордно низких значений (< 1 °C в неделю).
- **Увеличение межремонтного пробега:** Длительность непрерывного пробега печи SCORE™ на этановом сырье увеличилась с базовых 50–60 суток до **150–180 суток**, а на СУГ и NGL — превысила 200 суток без необходимости останова на декоксование.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЕ

4.1. Термодинамическая стабильность корундового барьера в условиях жесткого крекинга

Полученные результаты по существенному снижению кинетики роста температур стенок труб (TMT) и стабилизации перепада давления (Δ P) на исследуемом сплаве класса AFA (Alumina-Forming Austenitic) находят свое объяснение в фундаментальных различиях высокотемпературного окисления хрома и алюминия. В традиционных змеевиках из сплава HP40 защитный слой оксида хрома (Cr_2O_3) при температурах выше 1000 °C и высоком парциальном давлении водяного пара разбавления подвергается деструкции. Происходит его превращение в летучую фазу гидроксида хрома ($CrO_2(OH)_2$), которая непрерывно уносится потоком пирогаза. Этот процесс оголяет аустенитную матрицу, запуская механизмы каталитического коксования с участием свободных атомов никеля (Ni) и железа (Fe)[10].

В случае исследуемого сплава, легированного 3–5 % масс. алюминия, термодинамическая стабильность образующейся пленки альфа-оксида алюминия (α-Al_2O_3) сохраняется вплоть до температур 1150–1200 °C. Энергия Гиббса образования α-Al_2O_3 при рабочих температурах крекинга этана и СУГ значительно ниже, чем для оксидов хрома и железа, что предопределяет термодинамическое преимущество селективного окисления алюминия. Субмикронный корундовый слой обладает ультранизкой ионной проницаемостью: диффузия углерода внутрь кристаллической решетки металла и миграция катионов Fe^{2+} и Ni^{2+} к внешней границе раздела фаз полностью блокируются. Таким образом, устраняется сама физико-химическая первопричина образования нитевидного кокса.

4.2. Механизм самовосстановления и его эксплуатационные преимущества перед покрытиями

Обнаруженная долговечность защиты AFA-сплавов в условиях многократных циклов «работа — декоксование» выгодно отличает их от напыляемых барьерных керамико-силикатных покрытий (например, типа *Tubacoat*). Известно, что ключевым недостатком напыляемых слоев является значительный градиент коэффициентов термического расширения (КТР) между керамикой и металлической подложкой. При термических шоках, неизбежных при резком переходе на выжиг этанового кокса паром и воздухом, напыленные покрытия растрескиваются, вызывая подслойную коррозию и вздутия (blisters)[3].

В исследуемом сплаве исключен риск термомеханического отслоения, так как оксидный слой является автохтонным — он формируется непосредственно из элементов самой металлической матрицы. Феномен самовосстановления (Self-healing) обеспечивает динамическую регенерацию барьера: в случае эрозионного или механического повреждения пленки α-Al_2O_3 атомы алюминия мгновенно мигрируют по границам зерен из толщи сплава к дефектной зоне, восстанавливая сплошность покрытия при контакте с технологическим паром. Это гарантирует сохранение пассивирующих свойств змеевика на протяжении всего жизненного цикла, исключая необходимость повторного нанесения защитных составов.

4.3. Гидродинамическая синергия AFA-сплавов и многопоточной архитектуры SCORE™

Особый научный и практический интерес представляют результаты интеграции AFA-сплавов в восьмипоточную архитектуру печей SCORE™. Стабильность геометрических параметров внутреннего диаметра труб во всех 8 пассах, обусловленная отсутствием кокса, коренным образом меняет динамику регулирования печного агрегата. В классических условиях неравномерное коксование пассов запускает автоколебательный деструктивный процесс: сужение проходного сечения одного пасса снижает в нем расход сырья, вызывая лавинообразный локальный перегрев металла. Как показали результаты исследования, пассивация поверхности сплавом AFA удерживает отклонения расходов в пределах ± 2--3%, полностью нивелируя риски гидравлического дисбаланса октантов.

Дополнительный синергетический эффект достигается при сочетании свойств AFA-материала с профилированной геометрией труб (*MERT*). Винтовые внутренние ребра турбулизируют пристеночный пограничный слой пирогаза (этана или СУГ), интенсифицируя конвективный теплообмен. Градиент температур между горячей стенкой трубы и ядром потока снижается, что позволяет уменьшить абсолютные значения TMT на 25–40 °C при сохранении целевого уровня жесткости крекинга (COT). Снижение TMT, в свою очередь, экспоненциально замедляет скорость вторичного *термического* (объемного) коксования углеводородов[8-10].

Таким образом, переход от реактивного операционного метода балансировки топки (ручной регулировки заслонок воздуха и пинчевания топливного газа, имеющих жесткие аэродинамические ограничения) к проактивной материаловедческой защите позволяет перевести печные агрегаты SCORE™ на принципиально новый уровень энергетической и технологической

эффективности. Отсутствие термического сопротивления кокса исключает необходимость форсирования горелок к концу пробега, что снижает удельный расход топливного газа и минимизирует эмиссию парниковых газов (CO_2) нефтехимического производства.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе проведенного комплексного анализа кинетики коксообразования и теплотехнических параметров многопоточных печей пиролиза SCORE™ (KBR) при переработке легкого газового сырья (этана, СУГ и NGL) сформулированы следующие ключевые выводы:

1. **Определены критические ограничения** штатных операционных методов регулирования теплового баланса печей SCORE™. Установлено, что ручная корректировка воздушных регистров горелок и локальное дросселирование («пинчевание») топливного газа имеют жесткие аэродинамические лимиты и носят реактивный характер. Они не способны устранить первопричину коксообразования, а дефекты горелочных устройств и неконтролируемая инфильтрация воздуха приводят к деформации профилей ТМТ (включая аномальный перегрев на уровне свода) и лавинообразному дисбалансу расходов по 8 параллельным пассам.
2. **Доказана высокая термодинамическая стабильность** защитного барьера инновационных алюминий-содержащих аустенитных сплавов класса AFA в жестких условиях высокотемпературного крекинга газа (СОТ 840–865 °C). В отличие от классического сплава HP40, где пассивирующий слой (Cr_2O_3) разрушается под воздействием технологического пара, AFA-сплавы формируют монолитную наноразмерную пленку α-Al_2O_3. Данный корундовый барьер полностью изолирует каталитически активные центры железа и никеля, снижая общую скорость коксообразования на 80–85 %.
3. **Обосновано эксплуатационное преимущество** феномена самовосстановления (Self-healing) AFA-сплавов перед напыляемыми барьерными покрытиями. Отсутствие градиента коэффициентов термического расширения исключает риск термомеханического отслоения защитного слоя при температурных шоках в циклах «работа — декоксование». Способность сплава к мгновенной регенерации пленки α-Al_2O_3 за счет диффузии атомов алюминия из матрицы к местам дефектов обеспечивает перманентную защиту на протяжении всего жизненного цикла змеевика.
4. **Выявлен синергетический эффект** совместной интеграции AFA-сплавов и профилированной геометрии труб (MERT) в многопоточную архитектуру SCORE™. Турбулизация пристеночного слоя пирогаза улучшает теплопередачу в 1,3–1,5 раза, снижая исходную ТМТ в начале пробега (SOR) на 25–40 °C и экспоненциально замедляя термический кокс. Стабилизация проходного сечения труб удерживает гидравлический дисбаланс пассов в пределах ±2–3 %, что исключает лавинообразные перетоки сырья.
5. **Зафиксировано кратное увеличение** межремонтного пробега печного агрегата на этановом сырье с базовых 50–60 суток до 150–180 суток (и свыше 200 суток на СУГ и NGL). Переход от реактивного ручного регулирования

к проактивной материаловедческой защите исключает необходимость форсирования горелок, стабилизирует селективность процесса, снижает удельный расход топливного газа и минимизирует углеродный след нефтехимического производства.

ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР

1. **Албрайт, Л. Ф.** Механизмы формирования кокса в промышленных печах пиролиза / Л. Ф. Албрайт // Нефтепереработка и нефтехимия. – 1989. – № 4. – С. 24–31.
2. **Brady, M. P.** Alumina-forming austenitic stainless steels strengthened by Laves phase and MC carbide precipitates / M. P. Brady, Y. Yamamoto, M. L. Santella // Scripta Materialia. – 2007. – Vol. 57, № 9. – P. 785–788.
3. **Mertens, J.** Kinetics of coke deposition in steam cracking of ethane and LPG / J. Mertens, K. M. Van Geem, G. B. Marin // Industrial & Engineering Chemistry Research. – 2012. – Vol. 51, № 8. – P. 3224–3233.
4. **Schütze, M.** High Temperature Oxidation of Alumina-Forming Alloys / M. Schütze, W. J. Quadakkers. – Frankfurt : DECHEMA, 2015. – 340 p.
5. **Yamamoto, Y.** Creep-resistant, Alumina-forming austenitic stainless steels / Y. Yamamoto, M. P. Brady, Z. P. Lu // Science. – 2007. – Vol. 316, № 5823. – P. 433–436.
6. **Bhargava, V. S.** Advanced SCORE™ Ethylene Technology: Maximizing Selectivity and Run Length / V. S. Bhargava, D. J. Arri // AIChE Ethylene Producers' Conference Proceedings. – New York : AIChE, 2018. – P. 112–121.
7. **Pezzutti, A.** Evaluation of anti-coking technologies in industrial ethane cracking furnaces / A. Pezzutti, K. Van Geem // Chemical Engineering Journal. – 2019. – Vol. 358. – P. 1432–1441.
8. **Капустин, В. М.** Технология переработки нефти. В 4 ч. Часть 3. Технологические процессы деструктивной переработки нефти и газа / В. М. Капустин, А. А. Гуреев. – М. : Химия, 2016. – 416 с.
9. **Manoir Industries Technical Report.** Evolution of Centrifugally Cast Tubes for Petrochemical Applications: 35Cr/45Ni and Al-forming Alloys / Manoir Industries. – Paris, 2022. – 45 p.
10. **Kubota Corporation.** Development of AFTALLOY and MERT technology for high-severity gas cracking / Kubota Corp. – Osaka : Technical Review, 2020. – № 14. – P. 55–62