АНАЛИЗ ПРИЧИН ПОВРЕЖДЕНИЯ ОПОР ЮБОЧНОГО ТИПА РЕАКТОРОВ ЗАМЕДЛЕННОГО КОКСОВАНИЯ

ANALYSIS OF THE DAMAGE CAUSES TO THE SKIRT TYPE SUPPORTS FOR DELAYED COKING REACTORS

Ю. А. Бадьин
Yurii A. Badin

Всероссийский
научно-исследовательский
и конструкторско-технологический
институт оборудования
нефтеперерабатывающей
и нефтехимической
промышленности,
г. Волгоград,
Российская Федерация

All-Russian Research
and Design Institute of Equipment
for the Oil Refining
and Petrochemical Industry,
Volgograd, Russian Federation

А.Е. Годенко
Anatolii E. Godenko

Волгоградский государственный
технический университет,
г. Волгоград,
Российская Федерация

Volgograd State
Technical University,
Volgograd, Russian Federation

А. Н. Киселев
Anton N. Kiselev

Всероссийский
научно-исследовательский
и конструкторско-технологический
институт оборудования
нефтеперерабатывающей
и нефтехимической
промышленности,
г. Волгоград,
Российская Федерация

All-Russian Research
and Design Institute of Equipment
for the Oil Refining
and Petrochemical Industry,
Volgograd, Russian Federation

Е.Ю. Липатов
Evgenii Yu. Lipatov

Волгоградский государственный
технический университет,
г. Волгоград,
Российская Федерация

Volgograd State
Technical University,
Volgograd, Russian Federation

Т. А. Яновский
Timur A. Yanovskii

Всероссийский
научно-исследовательский
и конструкторско-технологический
институт оборудования
нефтеперерабатывающей
и нефтехимической
промышленности,
г. Волгоград,
Российская Федерация

All-Russian Research
and Design Institute of Equipment
for the Oil Refining
and Petrochemical Industry,
Volgograd, Russian Federation

Растрескивание сварного соединения опорной обечайки с корпусом – это очень распространенная форма повреждения коксовых камер. Это определяет актуальность темы определения причин возникновения таких повреждений, чему посвящена настоящая статья. Примером такого повреждения является инцидент, произошедший после всего 2 лет эксплуатации, на одном из нефтеперерабатывающих заводов с аварийным наклоном одной из коксовых камер.

Для проверки состояния металла была проведена вырезка образцов из поврежденной части опорной обечайки с исследованием химического состава, структуры, определения механических характеристик. Исследования основного металла и металла сварных швов показали соответствие требованиям соответствующих НТД на материал. Были проанализированы выполненные стандартные расчеты на прочность элементов корпуса сосуда. Для них условия прочности были выполнены с большим запасом, но это не предотвратило повреждений.

Был сделан вывод, что необходимо проведение математического моделирования условий эксплуатации сосуда с учетом неравномерности температурных полей на его поверхности, носящих случайный характер как в течение одного цикла коксования, так и в ряде последовательных циклов. Для сбора данных по фактическому распределению температур по поверхности аппарата были использованы дан-

Ключевые слова

коксовые камеры;
механизм повреждений;
конечно-элементное
моделирование

ные автоматической системы управления. Полученные данные использовались при проведении расчетов моделирования с помощью программного комплекса конечно-элементного анализа «ANSYS® Mechanical 2019 R3». Результаты расчетов по определению распределения напряжений в опорах находятся в соответствии с результатами натурного обследования с выявлением зон повреждений.

Причиной возникновения повреждений опор коксовых камер было определено применение импортной нержавеющей стали с высокой пластичностью и низкими значениями допускаемых напряжений, для которой отсутствует опыт изготовления основных деталей коксовых камер. На основании проведенных исследований сформулированы рекомендации по изменению конструктивного и материального исполнения коксовых камер. Для проверки эффективности предложенной измененной опорной конструкции проведено конечно-элементное моделирование, которое подтвердило правильность предложенных рекомендаций.

Cracking of the welded joint of the support shell with the shell is a very common form of damage to the coke drums. This determines the relevance of the topic of consideration of cases of such damage with the determination of the causes, which is the subject of this article. An example of such damage is an incident that occurred after only 2 years of operation, at one of the refineries with an emergency tilt of one of the coke drums.

To check the condition of the metal, samples were cut from the damaged part of the support shell to study the chemical composition, the determination of mechanical characteristics and the study of the structure. Studies of the base metal and the weld metal showed compliance with the requirements of the corresponding technical norms for the material. The performed standard strength calculations of the vessel body elements were analyzed. The strength conditions for them were met with a large margin, but this did not prevent the damage.

It is concluded that it is necessary to conduct a modeling of the vessel, taking into account the temperature fields on the surface of the vessel, which are random both during one coking cycle and in a number of consecutive cycles. To collect data on the actual temperature distribution on the surface of the device, data from the automated control system were used. The obtained data were used for simulation using the software package of finite element analysis «ANSYS® Mechanical 2019 R3». The results of calculations for determining the distribution of stresses in the support structures are in accordance with the results of field surveys to identify areas of damage.

The reason for the damage to the supporting devices of the coke drums was determined to be the use of imported stainless steel with high ductility and low permissible stresses, for which there is no experience in manufacturing the main parts of the coke drums. Based on the conducted research, recommendations are formulated for changing the design and material design of coke drums. To test the effectiveness of the proposed modified support structure, finite element modeling was carried out, which confirmed the correctness of the proposed recommendations.

Введение

Растрескивание сварного соединения опорной обечайки с корпусом — это очень распространенная форма повреждения коксовых камер [1–6]. Это определяет актуальность темы определения причин возникновения таких повреждений, чему посвящена настоящая статья.

Примером такого повреждения является инцидент, произошедший после всего 2 лет эксплуатации, на одном из нефтеперерабатывающих заводов с аварийным наклоном одной из коксовых камер. После удаления теплоизо-

ляции в районе соединения опорной обечайки с корпусом в двух камерах были обнаружены повреждения в виде потери формы опорной обечайки в районе приварки к корпусу и растрескивания сварного соединения опорной обечайки к корпусу. Имеется растрескивание небольшой протяженности в вершинах щелевых прорезей (рисунок 1). Протяженность растрескивания по окружности и расположение зоны растрескивания относительно бокового штуцера ввода сырья показаны на рисунке 2.

Keywords

coke drums;
mechanism of damage;
finite element modeling

Рисунок 1. Коксовая камера в месте присоединения опорной обечайки к корпусу (а, б); растрескивание в вершине щелевой прорези (в); растрескивание сварного соединения опорной обечайки к корпусу по линии сплавления (г)

Рисунок 2. Схема повреждения сварного шва приварки опорной обечайки к корпусу коксовой камеры Р-2 (слева) и Р-3 (справа); показано расположение штуцера ввода сырья «В»; показаны места вырезки образцов

После осмотра зон повреждения была проведена замер остаточных толщин стенок. Минимальная толщина опорной обечайки составила 16 мм, локальных потерь металла не наблюдалось.

Установка замедленного коксования на нефтеперерабатывающем заводе имеет четыре

камеры объемом 425 м³ каждая. Коксовые камеры изготовлены и пущены в эксплуатацию в 2018 г. Максимальная рабочая температура составляет 500 °С, расчетное давление — 0,4 МПа в верхней и 0,6 МПа в нижней части сосуда. Основные детали корпуса изготовлены из импортной нержавеющей стали UNS

S32100 ASTM A 240/M ED 2015a. Размеры камер: 5000 мм — внутренний диаметр, высота сосуда 27315 мм и высота конуса 4720 мм, номинальная толщина составляет для конической части 30 мм, цилиндрического корпуса в нижней части 30 мм, в средней 28 мм, в верхней части 25 мм. Опора юбочного типа представляет собой цилиндр, также изготовленный из стали UNS S32100 ASTM A 240/M ED 2015a толщиной 16 мм. Коксовые камеры имеют боковой ввод сырья.

Исследование металла опорной обечайки

Для проверки состояния металла была проведена вырезка образцов из поврежденной части опорной обечайки с исследованием химического состава и структуры, определения механических характеристик. Химический состав образца близок по составу к стали 08X18H10T, в соответствии с [9]. Химический состав сварного шва образца близок по составу с металлом шва, выполненного электродом ОЗЛ-8 (таблица 1). Характеристики прочности и пластичности металла (таблица 2) соответствуют требованиям [11]. Результаты измерения микротвердости (таблица 3), свидетельствуют о значительной структурно-механической неоднородности сварного шва.

После испытаний на статический изгиб образцов (до параллельности сторон) трещин и надрывов не обнаружено, что свидетельствует о достаточной пластичности исследуемого металла. Структура металла фрагмента опорной обечайки и сварного шва типична для ау-

стенистой нержавеющей стали 08X18H10T (рисунок 3). Трещиноподобные дефекты в металле сварного шва обнаруживаются только при использовании очень большого увеличения ($\times 2000$) по линиям межваликового несплавления, что говорит о малой величине указанных дефектов и о том, что они не оказали влияния на процесс растрескивания. Выявлены трещины в зоне термического влияния со стороны опоры, ориентированные вдоль выделений δ -феррита и проходящие по границам зерен (рисунок 3). Это соответствует картине повреждения, когда растрескивание сварного соединения происходило вблизи линий сплавления сварного шва. Основным металл и металл сварного шва характеризуются высокими показателями прочности и особенно пластичности, для него отсутствуют признаки деградации структуры и механических свойств, которые могли бы вызвать повреждения в ходе эксплуатации.

Расчетное исследование условий эксплуатации коксовых камер

Возникновение повреждения произошло после 379 рабочих циклов нагружения, не только до исчерпания установленного заводом-изготовителем расчетного ресурса в циклах нагружения (7500), но и менее 1000 циклов, нижнего минимального предела для выполнения проверки малоциклового прочностного ресурса. Это свидетельствует о невыполнении условий статической прочности.

В стандартных методиках расчета на статическую прочность основным критерием

Таблица 1. Сравнительные данные по химическому составу образцов [9]

Марка стали	Массовая доля элементов, %								
	C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	N	Ti
Основной металл	0,05	1,89	0,026	0,005	0,49	18,4	9,0	—	0,33
Сварной шов	0,064	1,47	0,015	0,008	0,64	17,0	9,43	—	0,082
08X18H10T	$\leq 0,08$	$\leq 2,00$	$\leq 0,035$	$\leq 0,02$	$\leq 0,8$	17,0–19,0	9,0–11,0	—	$5x(C)-0,7$

Таблица 2. Результаты испытаний основного металла

Номер образца	Температура испытания, °С	Предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	Предел прочности σ_B , МПа	Удлинение δ_5 , %	Сужение ψ , %
1	20	354	644	65	73
2		360	644	65	72
По ГОСТ 7350-77		≥ 205	≥ 510	≥ 43	—

Таблица 3. Микротвердость металла в различных зонах

Числа микротвердости HV _{0,1}		
Основной металл	Линия сплавления	Сварной шов
16,2–17,8	21,0–22,9	22,4–30,5

Рисунок 3. Слева — микроструктура сварного соединения, сварной шов имеет аустенитно-ферритную дендритную структуру, характерную для сварных швов аустенитной стали типа 08X18H10T, изображение $\times 500$; справа — трещина в зоне термического влияния, изображение $\times 100$

является сравнение допускаемых и расчетных значений напряжений, зависящих от величины действующего давления, максимальной температуры и типа расчетного элемента. Например, условие устойчивости опорной обечайки для рабочих условий было определено по формуле [7]: $F/[F] + M/[M] + (Q/[Q])^2 = 0,24 < 1$ (F , $[F]$, M , $[M]$, Q , $[Q]$ — расчетные и допускаемые значения осевого сжимающего усилия, изгибающего момента, поперечного усилия); напряжение в сварном шве, соединяющем корпус сосуда с опорной обечайкой, составило: $\sigma = 21,4$ МПа, при принятом допускаемом напряжении при расчетной температуре 520°C $[\sigma] = 76,8$ МПа. Условия прочности были выполнены с большим запасом, но это не предотвратило возникновения повреждений.

Зарубежными исследователями Р.С. Босвеллом и Т. Феррадо было показано [1], что основным недостатком подобного подхода является неучет неравномерности температурных полей на поверхности аппарата, носящих случайный характер как в течение одного цикла коксования, так и в ряде последовательных циклов.

Вопросу моделирования напряженно-деформированного состояния с учетом неравномерного распределения температур уделено

большое внимание в [6], где использовалась методика, основанная на случайной генерации распределения температур с использованием «карт Шухарта». Представляется методически правильным использование данных по фактическим распределениям температур для коксовой камеры, где зафиксированы повреждения. Для установок замедленного коксования, выполненных по современным проектам, характерно хорошее приборное оснащение коксовых камер. Поэтому задача сбора и систематизации данных по распределениям температур по наружной поверхности корпуса в настоящее время не создает принципиальных трудностей. Проводился анализ рабочих циклов нагружения за продолжительный период времени (полгода до времени инцидента). Данные по показаниям термопар анализировались с целью выявления максимальных значений перепада температур в горизонтальных и вертикальных сечениях сосуда и опорной обечайки в качестве исходных данных для расчетов на прочность (см. таблицу 4, рисунок 4). Данные расчетные ситуации соответствуют различным рабочим циклам нагружения. Также проверялось соблюдение в ходе эксплуатации требований технологического регламента, при этом нарушений не установлено.

Таблица 4. Описание расчетных ситуаций

№	Описание условий нагружения	Разность температур, $^\circ\text{C}$ (индекс приборов)	Стадия эксплуатации
1	Максимальная разность температур в опорной обечайке	196 (№ 6, 7)	Охлаждение
2	Максимальная разность температур в корпусе в зоне приварки опорной обечайки	163 (№ 11, 12)	Охлаждение
3	Максимальная разность температур между опорной обечайкой и корпусом сосуда	187 (№ 6, 10)	Охлаждение

Рисунок 4. Схема расположения термопар по наружной поверхности коксовой камеры в нижней части и опорной обечайке, показаны индексы термопар (№ 5–8 установлены на опорной обечайке, остальные по корпусу сосуда); также показан штуцер ввода сырья «В» Ду250

Исходными данными нагрузок для расчетов являются:

— нагрузки от внутреннего давления в сосуде — максимально допустимое значение согласно нормам технологической инструкции — 0,4 МПа;

— весовые нагрузки от корпуса сосуда и теплоизоляции — расчетные значения, полученные при использовании геометрии сосуда, а также с учетом отклонения от вертикального положения согласно данным геодезических измерений и расчетным значениям отклонений в ходе эксплуатации;

— весовые нагрузки от рабочей среды при максимально допустимом уровне согласно нормам по эксплуатации — 21 м;

— ветровые нагрузки, значения изгибающих моментов в расчетных сечениях по высоте сосуда приняты из проектных расчетов на прочность и устойчивость от ветровых нагрузок, при этом направление ветровой нагрузки совпадает с направлением отклонения верхней части сосуда от вертикали в результате температурных деформаций);

— температурные нагрузки в корпусе и опорной части сосуда — расчетные значения, полученные при использовании показаний термопар.

Граничные условия задачи расчетного исследования. Рассматривается задача стацио-

нарного термического и статического анализа. Рабочее давление и гидростатическое давление рабочей среды прикладывается к внутренней стенке сосуда. Изгибающие моменты от действия ветровых нагрузок прикладываются для расчетных сечений в зависимости от высоты относительно нижней точки сосуда. Учитывая наличие наружной теплоизоляции, принято, что теплообмен с окружающей средой отсутствует.

Описание расчетной модели. Для выполнения анализа использовался программный комплекс конечно-элементного анализа «ANSYS ® Mechanical 2019 R3». Температура конструкции задавалась в местах расположения термопар, согласно данным, полученным в результате регистрации показаний термопар. В остальных точках конструкции температура определялась методом линейной интерполяции. Напряжения оценивались по эквивалентному напряжению по 4-й теории прочности.

Для представления результатов расчетов используются стандартные средства программного комплекса «ANSYS ®», позволяющие визуализировать распределение поля температур и напряжений. Для облегчения оценки результатов расчета составлен рисунок 5, на котором показано распределение коэффициента запаса относительно допускаемых напряжений для расчетной ситуации № 1

(см. таблицу 4). Коэффициент запаса относительно допускаемых напряжений представляет собой отношение величины допускаемых напряжений для материала конструкции к величине эквивалентных напряжений, рассчитанных для каждого конечного элемента с учётом температуры в расчётной точке.

Анализ механического поведения опорной конструкции

Зоны повышенных локальных (местных) напряжений, превышающих максимально допустимый уровень, располагаются по корпусу сосуда и в опорной обечайке в виде протяженных зон, приближенных к сварному шву приварки опорной обечайки, пример на рисунке 5. По результатам проведенных расчетов именно для данной расчетной ситуации № 1 (см. таблицу 4) характерны наибольшие значения и наибольшие по площади зоны высоких напряжений в конструкции, в которых возникают повреждения. Невыполнение условий прочности в виде превышения напряжения допустимого значения достаточно для образования повреждений. Надо отметить локализацию высоких напряжений в вершинах щелевых прорезей.

Полученные данные находятся в соответствии с результатами натурного обследования,

согласно которым зона повреждений располагается в зоне расположения щелевых прорезей опорной обечайки с потерей формы опорной обечайки в зоне, приближенной к сварному шву приварки к корпусу, и растрескиванием сварного соединения опорной обечайки к корпусу. Вероятно, образование повреждений происходило в течение некоторого времени с развитием зоны повреждения, поскольку весовая нагрузка перераспределялась на оставшиеся целыми участки сварного шва.

После анализа расчетных ситуаций (см. таблицу 4), можно сделать вывод, что образование повреждений в наибольшей степени происходит на стадии охлаждения коксовой камеры. Все расчетные ситуации соответствуют стадии охлаждения. Когда коксовая камера начинает заполняться водой, то холодный фронт начинает подниматься вверх по корпусу сосуда, достигая высоты сварного шва приварки опорной обечайки к корпусу сосуда. В данном случае опорная обечайка играет роль своеобразного ребра жесткости для корпуса сосуда. На корпусе сосуда в процессе охлаждения водой создается зона с пониженной температурой вблизи сварного шва приварки опорной обечайки корпусу сосуда (см. рисунок 6). В результате возникает раз-

Рисунок 5. Коэффициент запаса относительно допускаемых напряжений с учётом температуры стенки, место расположения зоны с минимальным значением коэффициента запаса отмечено на рисунке буквами MN; расположение зоны с критическими значениями коэффициента запаса соответствует зоне повреждения (показаны стрелкой); величина коэффициента запаса изображена на рисунке в виде цветовых полей. Каждый цвет соответствует определённому диапазону значений, указанному на цветовой шкале (в левой части рисунка). Значения меньше 1 (синий цвет) означают превышение допускаемых напряжений. Максимальная величина отображаемого коэффициента запаса была ограничена значением 4 для удобства восприятия. Красный цвет на рисунке означает, что возникающие в этих частях конструкции эквивалентные напряжения в 3,8 или более раз меньше, чем допускаемые при заданной температуре

Рисунок 6. Пример распределения температуры в опоре и прилегающей части корпуса сосуда, в опорной обечайке возникает зона с большей температурой сравнительно с прилегающей частью корпуса (показана стрелкой)

ность температур между опорной обечайкой и корпусом сосуда.

Корпус сосуда получает охлаждение с деформацией сжатия, в результате к опорной обечайке, более нагретой относительно корпуса, прикладывается силовая нагрузка, стремящаяся деформировать ее по направлению «внутри», к осевой линии. Конструктивно опорная обечайка корпуса изготовлена с толщиной практически в 2 раза меньшей толщины обечайки корпуса, в зоне стыковки опорной обечайки с корпусом сосуда возникают значительные усилия, стремящиеся деформировать опорную обечайку внутрь (рисунок 7). Именно такой характер деформации опорной обечайки установлен в ходе натурального обследования. В научно-технической ли-

Рисунок 7. Схематическое изображение формирования зоны высоких напряжений в опорной обечайке в ходе операции охлаждения

тературе имеются данные о подобных повреждениях опор коксовых камер [3].

Для стали 08X18H10T для температур до 500 °С допускаемые напряжения назначаются по пределу текучести [12], что отражает высокую пластичность данных сталей. Поэтому превышение установленного значения допускаемого напряжения будет приводить к повреждению в виде пластической (необратимой) деформации. В условиях циклического характера эксплуатации будет происходить накопление деформаций в зоне опорной обечайки, приближенной к сварному шву приварки опорной обечайки к корпусу. В результате будет нарушаться геометрия конструкции опорной обечайки в этой зоне, с последующим растрескиванием сварного соединения.

Прямое воздействие на возникновение повреждений играет неравномерность распределения температуры (рисунок 8) по направлению расположения устройства ввода сырья с наклоном коксовой камеры и увеличением нагрузок растяжения для «горячей» стороны, т.н. «эффект банана» для коксовой камеры [2]. Такое распределение температур может создать изгибной наклон с увеличением нагрузок растяжения для «холодной» стороны. Наклон вызывается неравномерным потоком горячего сырья к корпусу камеры с какой-либо стороны или канализацией холодной воды через кокс к стенке камеры [2]. Неравномерность потоков горячего сырья и охлаждающей воды харак-

Рисунок 8. Схема образования изгибного наклона коксовой камеры для стадии охлаждения, $t_1 < t_2$

терна для коксовых камер с единственным боковым вводом. В данном случае происходит охлаждение стороны штуцера ввода сырья вследствие быстрого подъема воды по каналам, которые образовались в ходе движения паров продукта в цикле коксования. В результате эта сторона получает низкую температуру относительно противоположной стороны и будет испытывать растяжение. В результате действий напряжения растяжения будет происходить растрескивание сварного соединения опорной обечайки с корпусом. Сосредоточение зоны растрескивания на стороне наличия штуцера ввода сырья «В» (рисунок 2) подтверждает данный механизм повреждения.

Причина образования повреждений

Причиной можно считать применение в качестве материального исполнения сосудов стали UNS S32100 ASTM A240/M ED2015a, которая имеет отечественный аналог в виде стали 08X18H10T, с высокими показателями пластичности и низкими значениями допускаемых напряжений. Данные по химическому составу и механическим свойствам данных ста-

лей и стали 12X18H10T в состоянии поставки приведены в таблицах 5, 6.

В отечественной практике имеется опыт эксплуатации коксовых камер из нержавеющей стали. В качестве материального исполнения в данных случаях применялась сталь 12X18H10T [4, 5], за рубежом опыт применения стали UNS S32100 для изготовления коксовых камер отсутствует.

На рисунке 9 приведены значения допускаемых напряжений указанных сталей в зависимости от температуры согласно [8, 12]. Отечественная методика определения допускаемых напряжений и принятая за рубежом в основном совпадают. Основное различие связано принятием коэффициента запаса по временному сопротивлению в размере 3,5 вместо значения 3,0, который принят в отечественной методике для аустенитных хромоникелевых сталей, а также коэффициента запаса по длительной прочности 1,25 вместо коэффициента 1,5, принятому в отечественной методике. Для сталей 08X18H10T и 12X18H10T до 500 °C допускаемые напряжения назначаются по критерию предела текучести.

Таблица 5. Сравнительные данные по химическому составу сталей [9, 10]

Марка стали	Массовая доля элементов, %								
	C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	N	Ti
UNS S32100	≤ 0,08	≤ 2,00	≤ 0,045	≤ 0,03	≤ 0,75	17,0–19,0	9,0–12,0	≤ 0,1	5x(C+N)–0.7
08X18H10T	≤ 0,08	≤ 2,00	≤ 0,035	≤ 0,02	≤ 0,8	17,0–19,0	9,0–11,0	–	5x(C)–0.7
12X18H10T	≤ 0,12	≤ 2,00	≤ 0,035	≤ 0,02	≤ 0,8	17,0–19,0	9,0–12,0	–	5x(C)–0.8

Таблица 6. Сравнительные данные по механическим свойствам в состоянии поставки для листового материала [9, 11]

Марка стали	Предел текучести $s_{0,2}$, МПа	Предел прочности σ_B , МПа	Удлинение σ , %
UNS S32100	205	515	40
08X18H10T	205	510	43
12X18H10T	235	530	38

Поскольку коэффициенты запаса по критерию предела текучести в зарубежном и отечественном стандартах совпадают, то можно непосредственно сопоставить данные по допускаемым напряжениям.

Допускаемые напряжения для стали UNS S32100 даются в двух вариантах, первый вариант по стандартной методике и второй вариант, для которого величины допускаемых напряжений превышают величину 2/3 от предела текучести материала, но не превышают значения 90 % от предела текучести материала при соответствующей температуре [8]. Указывается, что такое разделение вводится вследствие низких значений предела текучести данного материала, и допускаемые напряжения по второму варианту могут приниматься для конструкций, в которых по условиям эксплуатации допускается большая деформация элементов. Данные значения напряжений не рекомендуются для фланцев и других элементов конструкций, где деформации могут привести к возникновению повреждений. Для проведения расчетов на прочность опор коксовых камер методически правильно использовать допускаемые напряжения по первому варианту.

Данный выбор обоснован циклическим характером эксплуатации коксовых камер, когда

большая часть эксплуатации проходит в условиях нагрева от температуры окружающей среды до рабочей, и наоборот. Нельзя считать допустимым, когда напряжения в элементах конструкции превышают предельное значение, рассчитанное по критерию предела текучести. В этом случае в них возникают необратимые деформации, и при циклическом нагружении будет происходить накопление и рост деформаций. Из рисунка 9 видно, что допускаемые напряжения стали UNS S32100 для диапазона расчетных температур значительно, на 30–50 %, менее допускаемых напряжений стали 12X18H10T, что влияет на выполнение условий прочности.

Мероприятия по предотвращению повреждений. При изготовлении коксовых камер из нержавеющей сталей необходимо отдавать предпочтение стали 12X18H10T. Действующие НТД, определяющие конструирование сосудов, работающих под давлением, не содержат требований, специфических для коксовых камер [13]. Неучет специфики такого оборудования представляется серьезным недостатком. За рубежом разработан и широко используется документ, определяющий требования к такому оборудованию [2].

Для коксовых камер, находящихся в эксплуатации, предложены изменения конструк-

Рисунок 9. Зависимость допускаемых напряжений сталей от температуры

ции опоры, верхняя часть опорной обечайки длиной 650 мм изготавливается из стали 12X18H10T и с увеличенной толщиной до 20 мм. Для проверки эффективности предложенной конструкции было проведено моделирование с использованием тех же условий нагружения. Результат показан на рисунке 10, где видно, что в опорной обечайке в зоне, при-

мыкающей к сварному шву приварки к корпусу, возникают отдельные участки повышенных напряжений, которые имеют уменьшенную площадь в сравнении с показанными на рисунке 5, поэтому риск пластической неустойчивости материала в значительной степени нивелируется.

Рисунок 10. Коэффициент запаса относительно допускаемых напряжений по ГОСТ 34233.1-2017 с учётом температуры стенки для опорной обечайки с изменением конструкции (синий и тёмно-синий цвет означают превышение допускаемых напряжений)

Выводы

1. Причиной возникновения повреждений опорных устройств коксовых камер является применение нержавеющей стали UNS S32100 ASTM A240/M ED2015a с высокой пластичностью и низкими значениями допускаемых напряжений, для которой отсутствует опыт изготовления основных деталей коксовых камер.

2. Расчеты напряженно-деформированного состояния узла приварки опорной обечайки к корпусу реактора с использованием фактических карт распределения температур показали, что при максимальных зафиксированных разностях температур напряжения в зонах опорной обечайки, приближенных к

сварному шву приварки опорной обечайки к корпусу, превышают допустимые значения.

3. В условиях циклических рабочих нагрузок возникновение зоны высоких напряжений привело к накоплению пластической деформации опорной обечайки в этих зонах и послужило причиной нарушения геометрии опорной обечайки, при достижении деформации высоких значений произошло растрескивание сварного соединения опорной обечайки с корпусом сосуда.

4. На основании проведенных исследований сформулированы рекомендации по изменению конструктивного и материального исполнения коксовых камер с целью повышения надежности.

СПИСОК ИСПОЛЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Boswell R.S., Farraro T., Sober M.J. Remaining Life Evaluation of Coke Drums // Plant Engineering, Operations, Design and Reliability: Materials of Symposium. Houston, USA. 1997. P. 1-15
2. API TR 934-G-2016. Design, Fabrication, Operational Effects, Inspection, Assessment, and Repair of Coke

Drums and Peripheral Components in Delayed Coking Units. Washington: American Petroleum Institute, 2016. 57 p.

3. Li Z., Wang H., Liu W., Zhou J., Zhang G. Finite Element Simulation, Safety Assessment and Countermeasure of the Coke Drum Leaning Process During the Quenching Stage // Automation, Mechanical Control and Computational Engineering (AMCCE-2017): Materials of 2nd International Conference. Beijing, China. 2017. Vol. 118. P. 532-536.

4. Егоров В.И. Совершенствование конструктивного и материального исполнения реакторов установок замедленного коксования: дис. ... канд. техн. наук. Уфа, 2000. 191 с.

5. Кузеев М.И. Закономерности накопления повреждений в сварных соединениях оболочек реакторов установок замедленного коксования: дис. ... канд. техн. наук. Уфа, 2000. 126 с.

6. Кузнецов А.А. Разработка метода оценки неоднородности напряженно-деформированного состояния реакторов установки замедленного коксования: дис. ... канд. техн. наук. Уфа, 2007. 99 с.

7. ГОСТ Р 51274-99. Сосуды и аппараты. Аппараты колонного типа. Нормы и методы расчета на прочность. М.: ИПК Издательство стандартов, 1999. 17 с.

8. ASME BPVC.CC.BPV-2015. An International Code. 2015 ASME Boiler and Pressure Vessels Code. New York: ASME, 2015. 1090 p.

9. ASTM A240 / A240M — 20a. Standard Specification for Chromium and Chromium-Nickel Stainless Steel Plate, Sheet, and Strip for Pressure Vessels and for General Applications. West Conshohocken P.A.: ASTM International, 2020. 12 p. DOI: 10.1520/A0240_A0240M-20A.

10. ГОСТ 5632-2014. Нержавеющие стали и сплавы коррозионностойкие, жаростойкие и жаропрочные. Марки. М.: Стандартинформ, 2015. 112 с.

11. ГОСТ 7350-77. Сталь толстолистовая коррозионно-стойкая, жаростойкая и жаропрочная. Технические условия. М.: ИПК Издательство стандартов, 2002. 12 с.

12. ГОСТ 34233.1-2017. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Общие требования. М.: Стандартинформ, 2019. 30 с.

13. ГОСТ 34347-2017. Сосуды и аппараты стальные сварные. Общие технические требования. М.: Стандартинформ, 2018. 110 с.

REFERENCES

1. Boswell R.S., Farraro T., Sober M.J. Remaining Life Evaluation of Coke Drums. *Materials of Symposium «Plant Engineering, Operations, Design and Reliability»*. Houston, USA, 1997, pp. 1-15

2. API TR 934-G-2016. *Design, Fabrication, Operational Effects, Inspection, Assessment, and Repair of Coke Drums and Peripheral Components in Delayed Coking Units*. Washington, American Petroleum Institute, 2016. 57 p.

3. Li Z., Wang H., Liu W., Zhou J., Zhang G. Finite Element Simulation, Safety Assessment and Countermeasure of the Coke Drum Leaning Process During the Quenching Stage. *Materials of 2nd International Conference «Automation, Mechanical Control and Computational Engineering (AMCCE-2017)»*. Beijing, China, 2017, Vol. 118, pp. 532-536.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ ABOUT THE AUTHORS

Бадьин Юрий Аркадьевич, старший научный сотрудник лаборатории № 2, АО «ВНИКТИ нефтехимоборудование», г. Волгоград, Российская Федерация

Yurii A. Badin, Senior Researcher of Laboratory No. 2, JSC «VNIKTI neftekhimoborudovanie», Volgograd, Russian Federation

4. Egorov V.I. *Sovershenstvovanie konstruktivnogo i material'nogo ispolneniya reaktorov ustanovok zamedlennogo koksovaniya: dis. kand. tekhn. nauk* [Improvement of the Structural and Material Performance of Reactors of Delayed Coking Units: Cand. Engin. Sci. Diss.]. Ufa, 2000. 191 p. [in Russian].

5. Kuzeev M.I. *Zakonomernosti nakopleniya povrezhdenii v svarnykh soedineniyakh obolochek reaktorov ustanovok zamedlennogo koksovaniya: dis. kand. tekhn. nauk* [Regularities of Damage Accumulation in Welded Joints of Reactor Shells of Delayed Coking Units: Cand. Engin. Sci. Diss.]. Ufa, 2000. 126 p. [in Russian].

6. Kuznetsov A.A. *Razrabotka metoda otsenki neodnorodnosti napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya reaktorov ustanovki zamedlennogo koksovaniya: dis. kand. tekhn. nauk* [Development of a Method for Assessing the Inhomogeneity of the Stress-Strain State of Reactors of a Delayed Coking Unit: Cand. Engin. Sci. Diss.]. Ufa, 2007. 99 p. [in Russian].

7. *GOST R 51274-99. Sosudy i apparaty. Apparaty kolonnogo tipa. Normy i metody rascheta na prochnost'* [State Standard R 51274-99. Vessels and Apparatus. Apparatus of Column Type. Norms and Methods of Strength Calculation]. Moscow, IPK Izdatel'stvo standartov Publ., 1999. 17 p. [in Russian].

8. *ASME BPVC.CC.BPV-2015. An International Code. 2015 ASME Boiler and Pressure Vessels Code*. New York, ASME, 2015. 1090 p.

9. *ASTM A240 / A240M — 20a. Standard Specification for Chromium and Chromium-Nickel Stainless Steel Plate, Sheet, and Strip for Pressure Vessels and for General Applications*. West Conshohocken P.A., ASTM International, 2020. 12 p. DOI: 10.1520/A0240_A0240M-20A.

10. *GOST 5632-2014. Nerzhavayushchie stali i splavy korrozionnostoikie, zharostoikie i zharoprochnye. Marki* [State Standard 5632-2014. Stainless Steels and Corrosion Resisting, Heat-Resisting and Creep Resisting Alloys. Grades]. Moscow, Standartinform Publ., 2015. 112 p. [in Russian].

11. *GOST 7350-77. Stal' tololistovaya korrozionno-stoikaya, zharostoikaya i zharoprochnaya. Tekhnicheskie usloviya* [State Standard 7350-77. Plate Steel, Corrosion-Resistant, Heat-Resistant and High-Temperature. Specifications]. Moscow, IPK Izdatel'stvo standartov Publ., 2002. 12 p. [in Russian].

12. *GOST 34233.1-2017. Sosudy i apparaty. Normy i metody rascheta na prochnost'. Obshchie trebovaniya* [State Standard 34233.1-2017. Vessels and Apparatus. Norms and Methods of Strength Calculation. General Requirements]. Moscow, Standartinform Publ., 2019. 30 p. [in Russian].

13. *GOST 34347-2017. Sosudy i apparaty stal'nye svarnye. Obshchie tekhnicheskie trebovaniya* [State Standard 34347-2017. Steel Welded Vessels and Apparatus. General Specifications]. Moscow, Standartinform Publ., 2018. 110 p. [in Russian].

Киселев Антон Николаевич, технический директор, АО «ВНИКТИ нефтехимоборудование», г. Волгоград, Российская Федерация

Anton N. Kiselev, Technical Director, JSC «VNIKTI neftekhimoborudovanie», Volgograd, Russian Federation

e-mail: ANKiselev@vnikti.rosneft.ru

Яновский Тимур Александрович, канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник лаборатории № 11, АО «ВНИКТИ нефтехимоборудование», г. Волгоград, Российская Федерация

Timur A. Yanovskii, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher of Laboratory No. 11, JSC «VNIKTI neftekhimoborudovanie», Volgograd, Russian Federation

e-mail: TAYanovsky@vnikti.rosneft.ru

Годенко Анатолий Ефимович, канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой прикладной математики, ВолГТУ, г. Волгоград, Российская Федерация

Anatolii E. Godenko, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Head of Applied Mathematics Department, VolgSTU, Volgograd, Russian Federation

e-mail: Forstud@vstu.ru

Липатов Евгений Юрьевич, канд. техн. наук, доцент кафедры прикладной математики, ВолГТУ, г. Волгоград, Российская Федерация

Evgenii Yu. Lipatov, Candidate of Engineering Sciences, Assistant Professor of Applied Mathematics Department, VolgSTU, Volgograd, Russian Federation

e-mail: Elpat@vstu.ru