АНАЛИЗ ПРИЧИН ПОВРЕЖДЕНИЯ ПОДВИЖНЫХ ОПОР КОКСОВЫХ КАМЕР

DAMAGE CAUSES ANALYSIS TO THE MOVABLE SUPPORTS OF THE COKE DRUMS

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. 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

В. М. Ящук
Valerii M. Yashchuk

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

Для коксовых камер частым случаем повреждения в ходе эксплуатации являются повреждения в виде растрескивания сварного шва приварки опорной обечайки к корпусу. Одним из вариантов решения проблемы является конструирование опорных устройств без жесткой связи с основанием подвижных опор. Применение таких опор получило достаточно широкое распространение, но в ходе эксплуатации выявилась проблема растрескивания сварных соединений. Установление причин возникновения повреждений является предметом настоящей статьи. Для проверки предположения о неравномерном распределении температур в опорах как причине образования повреждений был проведен тепловой контроль. Была установлена неравномерность температур в подкладных листах опорных стоек по высоте, наличие значительного перепада температур между подкладным листом и корпусом сосуда. Данные по перепадам температур были использованы для проведения уточненного расчета на прочность опор. Расчеты на прочность нахлесточных сварных соединений приварки подкладного листа к корпусу и подкладного листа с использованием фактических температур показали, что для нижней части сварного шва и подкладного листа напряжения значительно превышают допустимые значения. Возникновение зон высоких напряжений приводит к растрескиванию сварного соединения приварки подкладного листа и корпуса в нижней части с развитием растрескивания по всей протяженности и деформации подкладного листа с образованием зазоров с корпусом. Это подтверждается данными обследования опор. Основной причиной повреждаемости являются особенности конструкции с присоединением опорных стоек к корпусу с помощью подкладных листов и большие размеры опорных ребер с высокой теплоотводящей способностью. Все это привело к возникновению значительных перепадов температур и температурным нагрузкам, которые вызвали повреждения опор. На основании проведенных исследований сформулированы рекомендации по изменению конструктивного исполнения опорных устройств коксовых камер с целью повышения надежности.

Ключевые слова

коксовые камеры;
перепад температур;
расчет на прочность;
сварной шов

For coke drums, a common case of damage during operation is damage in the form of cracking of the weld of the support shell. One of the solutions to the problem is the construction of support devices without rigid connection with the base of movable supports. The use of such supports has become quite widespread, but during operation, the problem of cracking of welded joints has been revealed. The determination of the causes of the damage is the subject of this article. To check the assumption of an uneven temperature distribution in the supports as a cause of damage, a thermal control was carried out. The temperature difference in the support sheets of the support posts was found to be uneven in height, and there was a significant temperature difference between the support sheet and the vessel. The data on temperature differences were used to perform a calculation of the strength of the supports. Strength calculations for the lapwelded joints welding backing sheet to the shell and backing plate with the actual temperature showed that the lower part of the weld and backing sheet stresses significantly exceeds the permissible value. The occurrence of zones of high stress leads to cracking of welded joints in the lower part with the development of cracking along the entire length and deformation of the backing sheet to form a gap with the body. This is confirmed by the data from the observation of supports. The main cause of damage are the design features attach support ribs to the shell using the backing plates and the large size of the support ribs with a high ability to remove heat. All this led to significant temperature differences and temperature loads, which caused damage to the supports. Based on the conducted research, recommendations are formulated for changing the design of the support devices of the coke drums in order to increase reliability.

Введение

Для коксовых камер частым случаем повреждения в ходе эксплуатации являются повреждения в виде растрескивания сварного шва приварки опорной обечайки к корпусу [1–3]. Одним из вариантов решения проблемы является конструирование опорных устройств без жесткой связи с основанием подвижных опор. Применение таких опор получило достаточно широкое распространение, но в ходе эксплуатации выявилась проблема растрескивания сварных соединений. Установление причин возникновения повреждений является предметом настоящей статьи.

Описание конструкции опорных устройств

Опорные устройства представляют собой ряд подвижных опорных стоек в количестве 10 ед. (рисунки 1–3). Установка опорных стоек предусмотрена на тороидальном переходе от цилиндрического корпуса к нижнему коническому днищу (рисунок 1). Опорные стойки состоят из ряда ребер 1, приваренных к подкладному листу 2, ребра также приварены к нижней опорной пластине 3. Подкладной лист 2 приварен к корпусу 4. Нижняя опорная пластина 3 опирается на опорное кольцо 5, не находится в жесткой связи с ним, имеет возможность свободного перемещения при нагреве и охлаждении корпуса, болты 6 и гайки 7 не затянуты и предназначены только для ограничения перемеще-

Keywords

coke drums;
temperature difference;
strength calculation; weld

ния. Опорное кольцо 5 приварено к опорной обечайке 8, которая приварена к фундаментному кольцу 9. Опорные стойки закрыты съемными теплоизоляционными панелями 10. Каждая опорная стойка имеет 6 ребер. Приварка ребер к подкладному листу производится 2 вертикальными угловыми швами, приварка ребер к нижней опорной пластине производится 2 горизонтальными угловыми швами. Приварка подкладного листа производится 2 вертикальными нахлесточными швами к корпусу (рисунок 3). Материал опор — сталь 12ХМ, материал корпуса — сталь 12ХМ+08Х13.

Описание повреждений

Опорные стойки имели наружную теплоизоляцию в виде съемных панелей для возможности осмотра, поскольку для них была предвидена опасность растрескивания сварных соединений, что указано в Руководстве по эксплуатации коксовых камер. Практически сразу после начала эксплуатации была выявлена проблема растрескивания сварных соединений опор и на них проводились ремонты с подваркой сварных швов по аустенитному варианту. После 5 лет эксплуатации произошла аварийная ситуация с наклоном коксовой камеры из-за масштабного растрескивания. После этого специалистами предприятия было принято решение теплоизоляцию опор не восстанавливать для оперативного кон-

1 — ребро опорной стойки; 2 — подкладной лист; 3 — нижняя опорная пластина; 4 — корпус; 5 — опорное кольцо; 6 — болт; 7 — гайка; 8 — опорная обечайка; 9 — ребро наружной опорной стойки; 10 — кольцо наружной опорной стойки; 11 — шайба для болта наружной опорной стойки; 12 — ребро; 13 — фундаментное кольцо; 14 — съемная панель теплоизоляции

Рисунок 1. Схема опорных устройств, вид сбоку

Рисунок 2. Схема опорных устройств, вид сверху

Рисунок 3. Схема опорных устройств, фронтальный вид

троля состояния опор, при выявлении растрескивания проводятся ремонты. При осмотре обнаружены многочисленные случаи растрескиваний сварных швов приварки подкладных листов опорных стоек к корпусу и приварки ребер к подкладным листам для крайних в ряду. Место возникновения растрескивания в сварных швах приварки подкладного листа в нижней части шва показано левой стрелкой, цветом показана область распространения на всем протяжении шва; место возникновения растрескивания сварного шва приварки ребра к подкладному листу в нижней части сварного шва показано правой стрелкой, цветом показана малая длина рас-

трескивания (не более 300 мм) (рисунок 4). На рисунке 5 представлено растрескивание шва приварки подкладного листа к корпусу, при охлаждении произошло раскрытие трещин до 3–5 мм; повторное растрескивание, что видно по наличию металла ранее выполненного ремонтного шва (вид слева); вид зазора 20 мм между подкладным листом и корпусом сосуда опорной стойки в ходе ремонта (вид справа).

На всех опорных стойках проводились ремонты с устранением растрескивания, о чем свидетельствуют места подварок. В ходе осмотра установлено наличие растрескиваний ранее выполненных ремонтных швов (рисунок 5). Имеются растрескивания свар-

Рисунок 4. Место возникновения растрескивания в сварных швах приварки подкладного листа

Рисунок 5. Растрескивание шва приварки подкладного листа к корпусу

ных швов приварки подкладных листов по всей длине. На рисунке 5 показан вид подкладного листа с удаленным швом приварки к корпусу, слева стрелкой показано наличие значительного зазора 20 мм в нижней части между подкладным листом и корпусом; в верхней части зазор значительно меньше и не превышает 5 мм.

Тепловой контроль опор

Для проверки предположения о неравномерном распределении температур в опорах как причине образования повреждений был проведен тепловой контроль. В ребрах опорных стоек наблюдается значительная неравномерность температур, для крайних в ряду ребер температура изменяется от 300 °С в частях, примыкающих к подкладному листу, до почти температуры окружающей среды для краев ребер. Средняя температура для крайних в ряду ребер выше, чем для промежуточных ребер (рисунок 6).

Неравномерность температур наблюдается в подкладных листах опорных стоек по высоте, перепад температур между подкладным листом и корпусом в нижней части со-

ставляет в среднем 100 °С, с максимальным значением до 140 °С, в верхней части перепад температур между подкладным листом и корпусом составляет в среднем 50 °С (рисунок 7). Это обусловлено наличием ребер, которые играют роль элементов охлаждения. В нижней части ребра выполнены с большей шириной, чем в верхней части (рисунок 1) и отвод тепла в нижней части наиболее интенсивный.

Расчетные исследования прочности

Возникновение повреждений произошло не только до исчерпания проектного ресурса в циклах нагружения (2200), но и менее 1000 циклов, минимального предела для выполнения проверки малоциклового прочностного [4], что говорит о невыполнении условий статической прочности.

Локализация повреждений в нижней части сварных швов позволяет предположить, что причиной растрескивания служат перепады температур между корпусом и подкладным листом опорной стойки, что приводит к возникновению внутренних усилий растяжения сварного шва и подкладного листа из-за стес-

Рисунок 6. Результаты теплового контроля опорной стойки в нижней (слева) и верхней частях (справа); неравномерность температур в ребрах

Рисунок 7. В верхней части (справа) перепад температур между корпусом и подкладным листом составляет 48 °С; в нижней части (слева) – 110 °С

ненности температурной деформации корпуса. Ставится задача проведения расчета на прочность нахлесточного сварного шва при варки подкладных листов опорных стоек к корпусу и подкладного листа с фактическими температурами. Проводится проверка условий прочности от действия термических нагрузок без учета действия основных (весовых) нагрузок.

При определении механических характеристик материалов учитывается, что средняя температура стенки корпуса и подкладного листа превышает температуру наружной поверхности, которая интенсивно охлаждается излучением и конвекцией в окружающем воздухе. Согласно [5], расчетная температура увеличивается на 50 °С. Поскольку сварные швы в процессе неоднократных ремонтов заменены на швы, выполненные по аустенитному варианту, то проводится расчет на прочность для таких сварных швов.

Расчет на прочность нахлесточного сварного шва

Внутренний диаметр сосуда, $D = 7000$ мм.

Внутреннее давление в сосуде с учетом гидростатического давления рабочей среды (на уровне установки опор), $P = 0,4$ МПа.

Толщина стенки тороидального перехода, $S = 45$ мм.

Толщина подкладного листа опорной стойки, $S_1 = 25$ мм.

Материал корпуса и подкладного листа: сталь 12ХМ.

Сварные швы выполнены электродами марок ENiCrMo-3, ОЗЛ-25Б, Э-10Х20Н-

70Г2М2Б2В. В качестве материала аналога принимается сталь ХН60ВТ.

Наружная температура корпуса сосуда, $t_n = 400$ °С.

Средняя температура корпуса сосуда, $t_n = 450$ °С.

Наружная температура подкладного листа в нижней части, $t_n = 300$ °С.

Средняя температура подкладного листа в нижней части, $t_n = 350$ °С.

Наружная температура подкладного листа в верхней части, $t_n = 350$ °С.

Средняя температура подкладного листа в верхней части, $t_n = 400$ °С.

Коэффициент линейного расширения 12ХМ [5]: $\alpha = 1,39 \cdot 10^{-5}$ 1/°С.

Модуль продольной упругости для 12ХМ (450 °С) [5], $E = 1,71 \cdot 10^5$ МПа.

Допускаемые напряжения для стали ХН60ВТ получены на основе стандартной методики [5] по формуле:

$$[\sigma] = \min \left\{ \frac{R_{p0,2}}{n_T}; \frac{R_m}{n_B} \right\}.$$

В данном случае $R_{p0,2/t}$ — минимальный условный предел текучести при остаточном удлинении 0,2 % при расчетной температуре;

$R_{m/t}$ — минимальное значение временного сопротивления разрыву (предел прочности) при расчетной температуре;

n_T — коэффициент запаса прочности по пределу текучести, принимается значение 1,5;

n_B — коэффициент запаса прочности по временному сопротивлению разрыву (запас по пределу прочности), принимается значение 2,4.

Таблица 1. Данные по механическим характеристикам и допускаемым напряжениям стали ХН60ВТ в зависимости от температуры

Температура, °С	Предел текучести при 0,2 % остаточном удлинении, МПа	Предел прочности, МПа	Допускаемое напряжение, МПа
300	283	690	188
350	276	670	184
400	270	650	180

Рисунок 8. Расчетная схема нахлесточного сварного соединения

Используются данные по механическим характеристикам [6], результаты расчетов приведены в таблице 1. Расчетная схема задачи показана на рисунке 8.

Расчет нахлесточного сварного шва проводится по касательным напряжениям для сечения $a-b$ (рисунок 9). Учитывается, что в подкладных листах, жестко соединенных с тороидальным переходом, возникают напряжения от внутреннего давления в сосуде. Средний уровень напряжений в тороидальном переходе определяется по формуле, полученной из формулы (125) [7]:

$$\sigma_o = \frac{1}{2} \left(\frac{P \cdot D \cdot \beta_3}{S} - P \right) = \\ = \frac{1}{2} \left(\frac{0,4 \cdot 7000 \cdot 0,5}{45} - 0,4 \right) = 15,3 \text{ МПа,}$$

β_3 — коэффициент, принят из проектного расчета на прочность.

Величина напряжений растяжения в подкладном листе от внутреннего давления в сосуде будет определяться соотношением его толщины и толщины стенки тороидального перехода по формуле:

$$\sigma_p = \sigma_o \cdot \frac{S_1}{(S+S_1)} = \\ = 15,3 \cdot \frac{25}{(45+25)} = 5,5 \text{ МПа.}$$

Нижняя часть

Касательное напряжение в нахлесточном сварном шве подкладного листа определяется по формуле [8]:

$$\tau = \frac{P}{1,4 \cdot S_1 \cdot L} \leq [\tau].$$

Здесь L — длина сварного шва, м;

P — растягивающая сила, МН;

$[\tau]$ — допускаемое напряжение на срез, МПа.

Величина растягивающей силы от наличия перепада температур определяется по формуле:

$$P = F \cdot (\alpha \cdot \Delta t \cdot E + \sigma_p).$$

Здесь F — площадь поперечного сечения подкладного листа, м²;

величина F определяется по формуле: $F = S_1 \cdot L$;

α — коэффициент температурного расширения, $\frac{1}{^\circ\text{C}}$;

Δt — перепад температур между деталями, $^\circ\text{C}$;

E — модуль продольной упругости, МПа.

Значения коэффициента линейного температурного расширения и модуля продольной упругости берутся для металла корпуса со-

суда при наибольшей средней температуре. После преобразований получено:

$$\tau = 0,71 \cdot (\alpha \cdot \Delta t \cdot E + \sigma_p) = \\ = 0,71 \cdot (1,39 \cdot 10^{-5} \cdot 100 \cdot 1,71 \cdot 10^5 + 5,5) = \\ = 172,6 \text{ МПа.}$$

Допускаемое напряжение на срез определяется по формуле [8] для стали ХН60ВТ: $[\tau] = 0,6 \cdot [\sigma] = 0,6 \cdot 188,0 = 112,8 \text{ МПа.}$

Поскольку $172,6 > 112,8$, то условие прочности не выполнено.

Дополнительно проводится проверка выполнения условия прочности подкладного листа, растягиваемого из-за наличия перепада температур и внутреннего давления в сосуде. Напряжение определяется по формуле: $\sigma_p = \alpha \cdot \Delta t \cdot E + \sigma_p = 1,39 \cdot 10^{-5} \cdot 100 \cdot 1,71 \cdot 10^5 + 5,5 = 243,2 \text{ МПа.}$

Допускаемое напряжение для стали 12ХМ при 350 $^\circ\text{C}$: 137 МПа.

Поскольку $243,2 > 137,0$, то условие прочности не выполнено

Верхняя часть

Касательное напряжение в нахлесточном сварном шве подкладного листа определяется по формуле:

$$\tau = 0,71 \cdot (\alpha \cdot \Delta t \cdot E + \sigma_p) = \\ = 0,71 \cdot (1,39 \cdot 10^{-5} \cdot 50 \cdot 1,71 \cdot 10^5 + 5,5) = 88,2 \text{ МПа.}$$

Значения физико-механических свойств берутся для металла корпуса сосуда при средней температуре стенки. Допускаемое напряжение на срез для стали определяется по формуле [8]:

$$[\tau] = 0,6 \cdot [\sigma] = 0,6 \cdot 180 = 108,0 \text{ МПа.}$$

Поскольку $88,2 < 108,0$, то условие прочности выполнено.

Проверка выполнения условия прочности подкладного листа:

$$\sigma_p = \alpha \cdot \Delta t \cdot E + \sigma_p = 1,39 \cdot 10^{-5} \cdot 50 \cdot 1,71 \cdot 10^5 + 5,5 = 124,3 \text{ МПа.}$$

Допускаемое напряжение для стали 12ХМ при 400 $^\circ\text{C}$: 132 МПа.

Поскольку $124,3 < 132,0$, то условие прочности выполнено.

Обсуждение результатов расчетного исследования

Для нижней части нахлесточного сварного шва условия прочности не выполнены как для металла сварного шва, так и для основного металла, при этом превышение допускаемых напряжений для основного металла значительно больше, чем для металла сварных швов. Поскольку допускаемые напряжения для стали 12ХМ при данной температуре на-

значены по пределу текучести [5], то металл будет повреждаться с образованием остаточной деформации. Результаты осмотра подтверждают этот вывод, при осмотре выявлены многочисленные случаи больших зазоров между подкладными листами и корпусом. Растяжение подкладного листа снижает температурные нагрузки в конструкции, но при этом образование зазора ухудшает теплообмен между корпусом и подкладным листом и еще более увеличивает перепад температур между ними. Поэтому стабилизации напряженно-деформированного состояния конструкции не происходит, в результате происходит растрескивание сварных швов. Надо отметить значительное, более чем в 1,5 раза, превышение допускаемого значения напряжения для металла сварного шва, поэтому процесс растрескивания будет иметь интенсивный характер, что подтверждается данными эксплуатации. При растрескивании сварного шва нагрузки будут перераспределяться на целые участки шва, что будет приводить к развитию растрескивания.

Для верхней части сварного шва приварки подкладного листа к корпусу условия прочности выполняются. Поэтому растрескивание в верхней части шва происходить не будет, что подтверждается данными эксплуатации. При этом для основного металла напряжения практически приближаются к допустимым значениям.

Факторы, способствующие повреждению опор

Опоры данной конструкции известны достаточно давно [9]. Конструктивно они представляют собой ряд подвижных опорных стоек со значительными промежутками между ними. Основной причиной повреждаемости можно считать большие размеры опорных ребер и возникающую отсюда их высокую теплоотводящую способность.

Периметр окружности корпуса, свободный от опорных стоек, составляет половину от общего периметра корпуса (рисунок 2). Поэтому для обеспечения опорной функции ребра опорных стоек были выполнены со значительным размером по высоте 1230 мм. Поскольку установка опорных стоек была предусмотрена на нижней конической части сосуда, то это привело к тому, что ширина ребер внизу составила большую величину 490 мм, при ширине вверху 120 мм. Опорные ребра крепятся к подкладному листу с помощью сварки и фактически представляют собой элемент охлаждения. При их значительных размерах по высоте и по ширине и при большом количестве (6 ед. для опорной стойки) это обусловило возможность большого теплоотвода. Роль элемента охлаждения играет также нижняя опорная пластина.

Для уменьшения теплоотвода по проекту была предусмотрена теплоизоляция в виде на-

Рисунок 9. Окружная опорная конструкция [10]

кладных съемных панелей (рисунок 1). Действие ее без установки теплоизоляции между ребрами опорных стоек и без теплоизоляции нижней опорной пластины оказалось недостаточно эффективным. В негативную сторону также повлияло уменьшение толщины накладных теплоизоляционных панелей до 200 мм, в то время как толщина теплоизоляции остальных частей сосуда предусмотрена 250 мм (рисунок 2).

В результате возникли значительные перепады температур между корпусом сосуда и подкладными листами опорных стоек. В нижней части подкладных листов перепад температур наибольший, поэтому там начинается растрескивание сварных швов приварки подкладного листа. Вероятно, это растрескивание приводит к растрескиванию сварных швов приварки ребер к подкладному листу. После демонтажа теплоизоляции опор перепады температур увеличились и растрескивание усилилось, но при этом облегчился контроль повреждений и проведение ремонтов.

Рекомендации по конструированию опор

Известны конструкции опор с подвижными стойками, которые лишены указанных недостатков [10] (рисунок 9). Равномерное распределение опорных стоек по окружности позволяет уменьшить размер опорных ребер по высоте и ширине, сократить теплоотвод и перепады температур между подкладным листом и корпусом и тем самым предотвратить повреждения.

Предпочтительным является замена подкладного листа наплавкой на тороидальном переходе той же толщины и размеров, что позволит обеспечить отсутствие зазоров в соединении опорных стоек и корпуса и перепа-

дов температур с корпусом сосуда. Именно такая рекомендация была дана проектной организацией, но к сожалению, завод-изготовитель предпочел вариант изготовления опор с подкладным листом. В результате это привело к снижению надежности опор в ходе эксплуатации.

Выводы

1. Причиной повреждений опорных устройств коксовых камер являются конструктивные особенности (значительные размеры опорных ребер, использование подкладных листов для присоединения опорных стоек к корпусам сосудов), которые приводят к возникновению значительной разности температур между корпусами сосудов и подкладными листами опорных стоек и стесненности температурных деформаций корпусов.

2. Расчеты на прочность нахлесточных сварных соединений приварки подкладного листа к корпусу и подкладного листа с использованием фактических температур даже без учета действия основных (весовых) нагрузок показали, что для нижней части сварного шва и подкладного листа напряжения значительно превышают допустимые значения.

3. Возникновение зон высоких напряжений приводит к растрескиванию сварных соединений приварки подкладных листов и корпуса в нижней части с развитием растрескивания по всей протяженности и деформации подкладных листов с образованием зазоров с корпусом.

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

5. ГОСТ Р 34233.1-2017. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Общие требования. М.: Стандартинформ, 2019. 36 с.

6. Колосков М.М., Долбенко Е.Т., Каширский Ю.В. Марочник сталей и сплавов. М.: Машиностроение, 2001. 672 с.

7. ГОСТ Р 34233.2-2017. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Расчет цилиндрических и конических обечаек, выпуклых и плоских днищ и крышек. М.: Стандартинформ, 2018. 58 с.

8. Улитин Н.С. Соппротивление материалов. М.: Высшая школа, 1975. 264 с.

9. Самохин Ю.Н. Методы борьбы с трещинообразованием в сварном шве приварки опорной обечайки к корпусу реактора УЗК // Повышение эксплуатационной надежности нефтезаводского оборудования: сб. науч. тр. ВНИКТИнефтехимоборудование. М.: ЦНИИТЭнефтехим, 1991. С. 20–25.

СПИСОК ИСПОЛЪЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. API TR 934-G. Design, Fabrication, Operational Effects, Inspection, Assessment, and Repair of Coke Drums and Peripheral Components in Delayed Coking Units. Washington: API, 2016. 66 p.

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

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

4. ГОСТ Р 34233.6-2017. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Расчет на прочность при малоцикловых нагрузках. М.: Стандартинформ, 2019. 24 с.

10. Patent 7871500 US. Coke Drum Skirt / R. Lah. 2011.

REFERENCES

1. *API TR 934-G. Design, Fabrication, Operational Effects, Inspection, Assessment, and Repair of Coke Drums and Peripheral Components in Delayed Coking Units.* Washington, API, 2016. 66 p.

2. Egorov V.I. *Sovershenstvovanie konstruktivnogo i material'nogo ispolneniya reaktorov ustanovok zamedlen-nogo 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].

3. Kuzeev M.I. *Zakonomernosti nakopleniya povrezhdenii v svarnykh soedineniyakh obolochek reaktorov ustanovok zamedlenno 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].

4. *GOST R 34233.6-2017. Sosudy i apparaty. Normy i metody rascheta na prochnost'. Raschet na prochnost' pri malotsiklovyykh nagruzkakh* [State Standard R 34233.6-2017. Vessels and Apparatus. Norms and Methods of Strength Calculation. Strength Calculation under Low-Cyclic Loads]. Moscow, Standartinform Publ., 2019. 24 p. [in Russian].

5. *GOST R 34233.1-2017. Sosudy i apparaty. Normy i metody rascheta na prochnost'. Obshchie trebovaniya* [State Standard R 34233.1-2017. Vessels and Apparatus.

Norms and Methods of Strength Calculation. General Requirements]. Moscow, Standartinform Publ., 2019. 36 p. [in Russian].

6. Koloskov M.M., Dolbenko E.T., Kashirskii Yu.V. *Marochnik stalei i splavov* [Brand of Steels and Alloys]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2001. 672 p. [in Russian].

7. *GOST R 34233.2-2017. Sosudy i apparaty. Normy i metody rascheta na prochnost'. Raschet tsilindricheskikh i konicheskikh obechaek, vypuklykh i ploskikh dnishch i kryshek* [State Standard R 34233.2-2017. Vessels and Apparatus. Norms and Methods of Strength Calculation. Calculation of Cylindric and Conic Shells, Convex and Flat Bottoms and Covers]. Moscow, Standartinform Publ., 2018. 58 p. [in Russian].

8. Ulitin N.S. *Soprotivlenie materialov* [Strength of Materials]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1975. 264 p. [in Russian].

9. Samokhin Yu.N. *Metody bor'by s treshchinoobrazovaniem v svarnom shve privarki opornoj obechaiki k korpusu reaktora UZK* [Methods for Fighting Cracking in the Weld Seam of Welding the Support Shell to the UZK Reactor Pressure]. *Sbornik nauchnykh trudov VNIKTIneftekhimoborudovanie «Povyshenie ekspluatatsionnoi nadezhnosti neftezavodskogo oborudovaniya»* [Collection of Scientific Papers of VNIKTIneftekhimoborudovaniya «Improving the Operational Reliability of Refinery Equipment»]. Moscow, TsNIITneftekhim Publ., 1991, pp. 20–25. [in Russian].

10. Lah R. *Coke Drum Skirt*. Patent US, No. 7871500, 2011.

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

e-mail: BadinYuA@vniktinho.ru

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

Ящук Валерий Максимович, инженер 2 категории отдела супервайзинга ремонтных работ, АО «ВНИКТИ нефтехимоборудование», г. Волгоград, Российская Федерация.

Valerii M. Yashchuk, Engineer of the 2nd Category of Repair Works Supervising Department, JSC «VNIKTI neftekhimoborudovanie», Volgograd, Russian Federation

e-mail: yasoft@mail.ru