

DOI 10.22363/1815-5235-2020-16-3-193-202
УДК 662.7

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Анализ повреждаемости и оценка влияния повреждений на работу несущих конструкций нефтеперерабатывающих трубчатых печей

А.В. Голиков*, Д.И. Субботин

Волгоградский государственный технический университет, Российская Федерация, 400005, Волгоград, проспект имени Ленина, 28
*alexandr_golikov@mail.ru

История статьи:

Поступила в редакцию: 31 марта 2020 г.
Доработана: 21 апреля 2020 г.
Принята к публикации: 28 апреля 2020 г.

Аннотация

Актуальность. По причине широкого распространения на практике в качестве объекта исследования данной работы выбраны печи трубчатой конструкции. В статье приведен анализ повреждений несущих конструкций нефтеперерабатывающих трубчатых печей. Установлены причины возникновения повреждений и физическая природа их развития. По результатам натурных обследований установлено, что около 10 % печей эксплуатируется с повреждениями в виде значительных искривлений несущих конструкций, которые развились в результате взрыва газозвушной смеси и технологического продукта внутри пространства печи. **Целями** исследования являются анализ повреждаемости и оценка влияния повреждений на работу несущих конструкций печей. **Методы.** Основные результаты получены путем статического численного анализа пространственных моделей каркасов печей в программном комплексе ЛИРА-САПР. Данный комплекс относится к классу программных продуктов, реализующих метод конечных элементов. **Результаты.** Расчет серии моделей сооружений позволил определить влияние повреждений на работу несущих конструкций печи. На основе анализа данных расчета моделей трубчатых печей с повреждениями и сопоставления результатов расчета моделей печей с повреждениями конструкций, выявленными при проведении обследований, предложены пути оптимизации конструктивных решений промышленной печи. Проведенное исследование показало необходимость совершенствования конструкции трубчатых печей в направлении модернизации технологии и конструктивной формы несущего каркаса печи.

Ключевые слова: промышленные печи, обследование, повреждения, деформации, напряженно-деформированное состояние

Для цитирования

Голиков А.В., Субботин Д.И. Анализ повреждаемости и оценка влияния повреждений на работу несущих конструкций нефтеперерабатывающих трубчатых печей // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2020. Т. 16. № 3. С. 193–202. <http://dx.doi.org/10.22363/1815-5235-2020-16-3-193-202>

Введение

Продолжительное время конструкции промышленных печей относились к оборудованию. При выполнении оценки технического состояния большая часть внимания уделялась поддержанию работоспо-

собного состояния технологического оборудования, в частности конструкции змеевиков и футеровки. По результатам осмотра несущих конструкций печей, находящихся в эксплуатации, установлено развитие значительных повреждений, реализовавшихся в виде искривлений элементов каркаса стрелкой до 150 мм.

Предметом исследования данной работы являются качественные и количественные характеристики дефектов и повреждений, характер изменения напряженно-деформированного состояния под влиянием повреждений.

Объектом исследования являются несущие и ограждающие конструкции трубчатых печей.

Голиков Александр Владимирович, кандидат технических наук, доцент, кафедра строительных конструкций, оснований и надежности сооружений; eLIBRARY SPIN-код: 1369-7819.

Субботин Дмитрий Игоревич, магистрант, кафедра строительных конструкций, оснований и надежности сооружений; eLIBRARY SPIN-код: 6354-2208.

© Голиков А.В., Субботин Д.И., 2020

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Конструктивная форма сооружения представлена несущими конструкциями, объединенными в единую пространственную систему – несущий остов, и ограждающими конструкциями, изолирующими и защищающими внутреннюю среду от внешней среды и воздействий с ее стороны.

Целями исследования являются анализ повреждаемости и оценка влияния повреждений на работу несущих конструкций печей. Для их достижения решены следующие задачи исследования:

- выполнен анализ существующих конструктивных решений нефтеперерабатывающих печей;
- проведены обследования фактического состояния ряда промышленных трубчатых печей;
- проведен анализ типовых повреждений конструкций каркаса и причин их появления;
- определены количественные показатели влияния повреждений на несущую способность конструкции печи.

1. Анализ конструктивных решений

По конструктивной схеме промышленная печь представляет собой сложную пространственную систему, состоящую из расположенных в вертикальном и горизонтальном направлении стержней, укрепленных пластинами обшивки и пода. Работа стержней и пластин описана в работах [1–7].

В работе [4] описываются недостатки взрывных окон, предназначенных для снижения давления взрыва на конструкции печи. Отмечается постепенный сдвиг в нефтегазовой промышленности в сторону удаления или сварки взрывных окон, что не является рациональным решением данной проблемы.

Классификация промышленных трубчатых печей по конструктивным признакам приведена в работах [8; 9]. В работе [8] также указана необходимость оптимизации как оборудования печи, так и несущих и ограждающих конструкций по причине низкого КПД существующих печей, неэкономного расходования ресурсов и значительных капитальных затрат при эксплуатации.

Особенности обследования металлических конструкций приведены в работах [9–11].

Согласно общепринятой классификацией основного технологического оборудования НПЗ, трубчатая печь представляет собой высокотемпературное термотехнологическое устройство с рабочей камерой, огражденной от окружающей атмосферы. Трубчатые печи предназначены для высокотемпературного нагрева нефти или нефтепродуктов в процессе их переработки.

Несмотря на большое разнообразие конструкций печей, принцип работы их во многом однотипен. Как правило, рабочая камера печи разделена

полуперегородкой на две части, называемые радиационной и конвекционной камерами. В этих камерах размещены трубные змеевики, через поверхности которых осуществляется теплопередача.

Радиационная теплопередача представляет собой поглощение лучистого тепла, конвективная теплопередача осуществляется путем омывания поверхностей труб дымовыми газами.

В камере радиации основное тепло передается радиацией и незначительно конвекцией, в камере конвекции – наоборот. Мазут или газ сжигается при помощи горелок, располагаемых на поду или на стенах радиационной камеры. При сгорании образуется светящийся факел, излучающий тепло. Тепловые лучи падают на наружные поверхности змеевиков камеры радиации и поглощаются, создавая так называемую поглощающую поверхность. Также тепловые лучи попадают и на внутренние поверхности стен радиационной камеры печи. Нагретые поверхности стен, в свою очередь, излучают тепло, которое поглощается поверхностями змеевиков камеры радиации.

Признаки для классификации существующих трубчатых печей: технологические, теплотехнические и конструктивные (рис. 1).

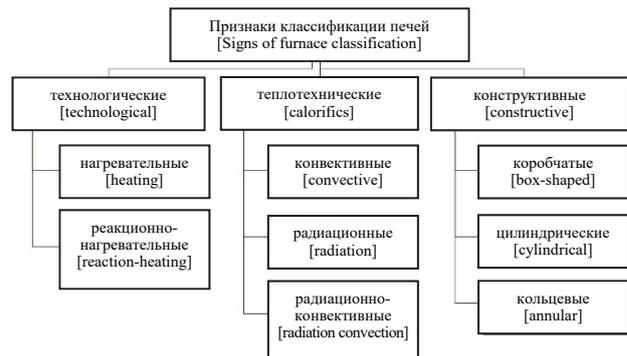


Рис. 1. Признаки классификации печей
[Figure 1. Signs of furnace classification]

Остановимся на каждом признаке подробнее.

Технологические признаки. По технологическому назначению различают печи нагревательные и реакционно-нагревательные. Нагревательные печи предназначены для нагрева сырья до заданной температуры. Реакционно-нагревательные печи предназначены как для нагрева сырья, так и для передачи ему тепла, необходимого для проведения эндотермических реакций.

Теплотехнические признаки. По теплотехническим признакам различают печи конвективные, радиационные, радиационно-конвективные.

Конвективная печь состоит из двух основных частей – камеры сгорания и трубчатого пространства, которые отделены друг от друга стеной так, что трубы не подвергаются прямому воздействию

пламени и большая часть тепла передается нагреваемому веществу путем конвекции. В радиационной печи все трубы, через которые проходит нагреваемое вещество, помещены на стенах камеры сгорания, поэтому у радиационных печей камера сгорания значительно больше, чем у конвективных. Радиационно-конвективные имеют две секции: камеру радиации и камеру конвекции.

По **конструктивным признакам** типы каркасов делятся следующим образом (рис. 2).

Коробчатые с верхним отводом дымовых газов (тип ВС) (рис. 2, а). Вертикальное расположение труб радиационного змеевика. Свободное вертикально-факельное сжигание комбинированного топлива. В камере радиации установлен однорядный вертикальный настенный экран. Конвективная камера с горизонтальными трубами расположена над радиационной камерой. Горелки находятся в поду печи.

Размещение двух камер радиации рядом возможно благодаря обслуживанию горелок с одной стороны печи. Камера конвекции у двух камер радиации общая (тип ВС2). Печи типа ВС могут применяться на установках АТ, вторичной переработки и т. д.

Коробчатые с верхним отводом дымовых газов (тип ГС) (рис. 2, б). Горизонтальное расположение труб змеевика. Свободное вертикально-факельное сжигание комбинированного топлива. В камере радиации установлены однорядные или двухрядные горизонтальные трубные экраны. Горелки находятся в поду печи. Размещение двух камер радиации рядом возможно благодаря обслуживанию горелок с одной стороны печи. Камера конвекции у двух камер радиации общая (тип ГС2). Печи типа ГС применимы на установках первичной перегонки, а также во вторичных процессах. Печи ГС2 – предпочтительны на установках замедленного коксования.



Рис. 2. Классификация трубчатых печей по конструктивным признакам [13]
[Figure 2. Classification of tube furnaces according to design features [13]]

Цилиндрические с верхним отводом дымовых газов (тип ЦС) (рис. 2, в). Пристенное расположение труб змеевика в одной камере радиации. Свободное вертикально-факельное сжигание комбинированного топлива. В радиационной камере установлен вертикальный либо в виде витой спирали однорядный настенный трубный экран. Камера конвекции с горизонтальным размещением труб расположена над камерой радиации. Горелки находятся в поду печи. Существует два варианта исполнения печей типа ЦС: без камеры конвекции (радиантная печь) и с камерой конвекции (радиантно-конвективная печь).

Кольцевые с верхним отводом дымовых газов (тип КС) (рис. 2, г). Вертикальный трубный змеевик в конвекционной и радиантной камере. Свободное вертикально-факельное сжигание топлива. В радиационной камере расположен вертикальный однорядный настенный трубный экран. Цилиндриче-

ская радиантная камера установлена соосно с кольцевой камерой конвекции, в которой находится конвективный змеевик. Змеевик набирается секциями. Горелки размещены в поду печи.

Установка АВТ представляет собой комбинацию из блоков АТ+ВТ: АТ – атмосферная трубчатка (первичная переработка поступающей на НПЗ сырой нефти), ВТ – вакуумная трубчатка (переработка мазута, поступающего с блока АТ).

2. Анализ типовых повреждений конструкций каркаса и причин их появления

Характеристики повреждаемости конструкций сооружения являются показателями несовершенства конструктивной формы и указывают на пути ее оптимизации.

Основные типы повреждений установлены по результатам натурных осмотров, проведенных при выполнении обследования серии печей. В табл. 1

приведены максимально реализовавшиеся при эксплуатации значения повреждений, полученные по результатам статистической обработки данных замеров.

Особенности обследования зданий и сооружений, подверженных воздействию взрывных нагрузок приведены в литературе [14–16]. По результатам обследования промышленных печей было выявлено, что при воздействии взрыва кожух и каркас печи получают значительные искривления. Существуют конструктивные мероприятия для ослабления давления взрыва на каркас, например устройство предохранительных окон.

Предохранительные окна предназначены для ослабления силы хлопка (взрыва) в топке печи в случае нарушения нормального режима. При ремонтах окнами пользуются как лазами, через которые обслуживающий персонал проникает внутрь печи. Результаты обследования печей с повреждениями после взрыва показали, что существующие конструктивные решения взрывных окон не обеспечивают достаточное ослабление силы хлопка. В результате несовершенства предохранительных конструкций возникают значительные деформации кожуха и несущих элементов каркаса.

Таблица 1

Виды повреждений конструкций печи

Вид повреждения	Степень развития	Причина появления
Коррозионный износ обшивки кожуха	Износ до $\delta = 100\%$	Длительная эксплуатация, отсутствие планово-предупредительных ремонтов. Сложность обслуживания закрытых пазух (рис. 3, <i>д</i>)
Деформация стальных листов кожуха	Локальные впадины/выпуклости стрелкой до $f = \pm 50$ мм	Нарушение нормального режима работы, воздействие взрыва, воздействие повышенных температур вследствие износа футеровки (см. рис. 3, <i>е</i>)
Деформация стоек и ригелей каркаса	Искривление продольной оси в виде прогиба до $f = 150$ мм	Нарушение нормального режима работы, воздействие взрыва, воздействие повышенных температур вследствие износа футеровки (деформации стоек – рис. 3, <i>з</i> ; деформации ригелей – рис. 3, <i>а</i>)
Деформация связей	Разрыв отдельных связей, искривление продольной оси в виде прогиба до $f = 150$ мм	Нарушение нормального режима работы, воздействие взрыва, воздействие повышенных температур вследствие износа футеровки
Совокупность дефектов конструкции пода	Прогиб балок пода стрелкой до $f = 140$ мм; разорванные элементы жесткости пода (пластины и уголки)	Нарушение нормального режима работы, воздействие взрыва, воздействие повышенных температур вследствие износа футеровки (рис. 3, <i>б</i>)
Разрушение футеровки	До 50 % толщины	Длительная эксплуатация, отсутствие планово-предупредительных ремонтов, нарушение нормального режима работы, воздействие взрыва (рис. 3, <i>е</i>)

Table 1

Types of defect to furnace designs

Types of defect	Degree of development	Reason for occurrence
Corrosion wear on casing	Wear to $\delta = 100\%$	Long-term operation, lack of scheduled preventive repairs. Difficulty maintaining closed sinuses (figure 3, <i>d</i>)
Deformation of the steel sheets of the casing	Local hollows/bulges-up arrow $f = \pm 50$ mm	Violation of the normal mode of operation, the effect of an explosion, the effect of elevated temperatures due to wear of the lining (figure 3, <i>e</i>)
Deformation of the struts and crossbars of the frame	Curvature of the longitudinal axis in the form of a deflection to $f = 150$ mm	Violation of the normal mode of operation, the effect of an explosion, the effect of elevated temperatures due to wear of the lining (rack deformations – figure 3, <i>z</i> ; deformation of crossbars – figure 3, <i>a</i>)
Bond deformation	Separation of individual bonds, curvature of the longitudinal axis in the form of a deflection to $f = 150$ mm	Violation of the normal mode of operation, the effect of an explosion, the effect of elevated temperatures due to wear of the lining
Hearth design defect set	Deflection of the beams under the arrow to $f = 140$ mm; torn floor stiffeners (plates and corners)	Violation of the normal mode of operation, the effect of an explosion, the effect of elevated temperatures due to wear of the lining (figure 3, <i>b</i>)
Lining destruction	To 50% thickness	Long-term operation, lack of scheduled preventive repairs, violation of normal operation, explosion effects (figure 3, <i>e</i>)



Рис. 3. Характерные повреждения конструкции печи:
a – деформация ригелей каркаса; *б* – искривление настила, ребер пода; *в* – деформация листов обшивки;
г – искривление стоек каркаса; *д* – коррозионный износ кожуха до 100 % толщины; *е* – обрушение футеровки на отдельных участках
[Figure 3. Typical defects in furnace design:
a – deformation of the crossbars of the supporting frame; *б* – bottom curvature; *в* – deformation of metal sheathing sheets;
г – curvature of the struts of the supporting frame; *д* – corrosion wear of metal sheets up to 100%; *е* – local destruction of the lining]

3. Оценка влияния повреждений на несущую способность конструкции печи

Для получения знаний о природе развития повреждений и оценки влияния повреждений на несущую способность конструкций печи созданы расчетные модели трубчатых печей и выполнен пространственный расчет.

Оценка изменения несущей способности несущего каркаса печи выполнена по результатам расчета моделей в программном комплексе ЛИРА-САПР 2016 в соответствии с требованиями нормативных документов [17–20]. Матрица геометрических размеров моделей для проведения численных исследований приведена в табл. 2, матрица размеров повреждений – в табл. 3.

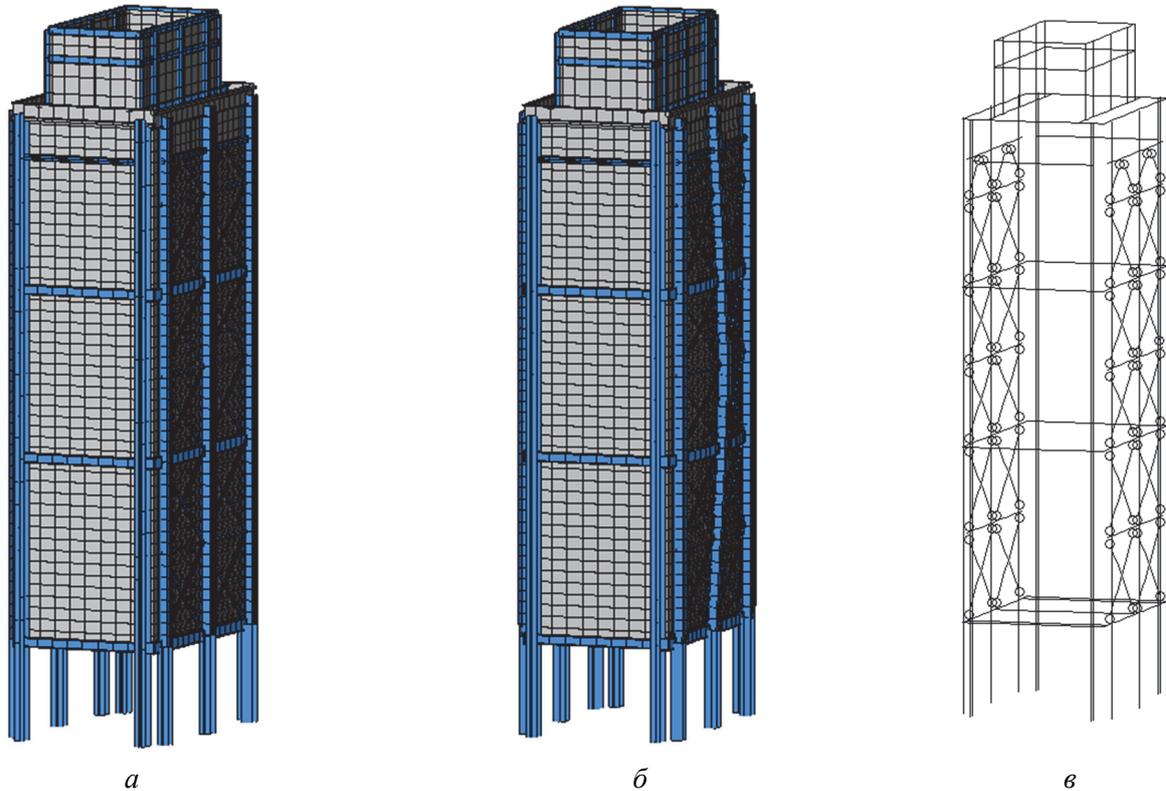


Рис. 4. Расчетная модель несущего каркаса промышленной печи:
a – недеформированная модель; *б* – модель с учетом деформаций; *в* – стержневая модель
 [Figure 4. Calculation model of the supporting frame of an industrial furnace:
a – undeformed model; *б* – deformed model; *в* – core model]

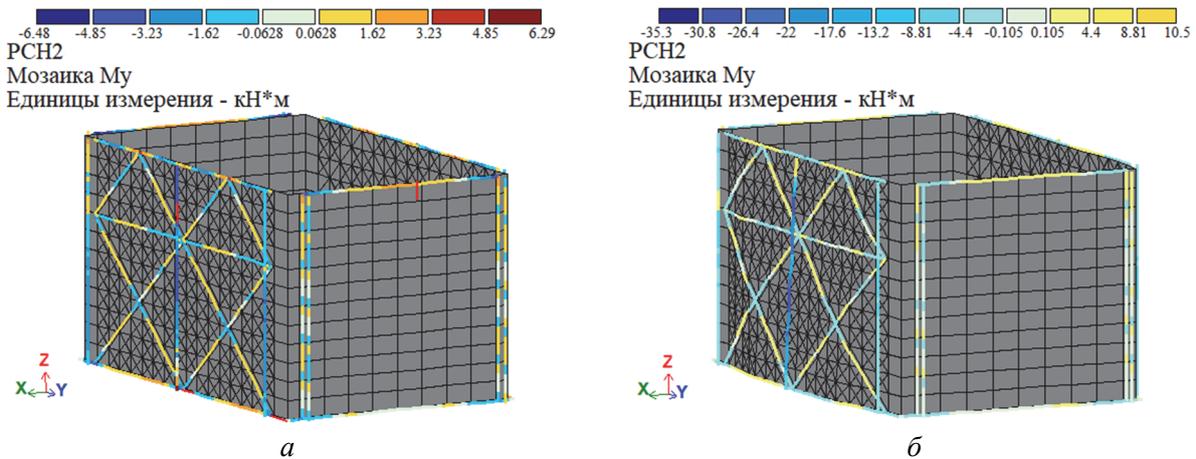


Рис. 5. Мозаика изменения изгибающего момента относительно оси *Y*:
a – недеформированная модель; *б* – модель с учетом деформаций
 [Figure 5. Changes in bending moment about the *Y*-axis:
a – undeformed model; *b* – deformed model]

Таблица 2

Матрица геометрических размеров моделей
[Table 2. Matrix of geometric sizes of models]

Геометрический параметр [Geometric parameter]	Количество секций трубчатой печи [The number of sections of the tube furnace]		
	1	2	3
a, (м) [a, (m)]	6,0	6,0	6,0
b, (м) [b, (m)]	3,6	7,2	10,8
h, (м) [h, (m)]	18,0	18,0	18,0

Таблица 3

Матрица размеров повреждений
[Table 3. Damage dimension matrix]

Тип повреждения [Type of defect]	Диапазон изменения, мм [Range of change, mm]	Шаг варьирования повреждения, мм [Defect variation step, mm]
Деформация стальных листов кожуха [Deformation of the steel sheets of the casing]	50,0–300,0	50,00
Деформация стоек каркаса [Frame rack deformation]	0,0–150,0	25,00
Деформация ригелей каркаса [Skeleton deformation]	0,0–150,0	25,00
Деформация связей [Bond deformation]	0,0–75,0	15,00

Таблица 4

Влияние повреждений на конструкции печи

Вид повреждения	Природа повреждения	Влияние повреждения
Коррозионный износ обшивки кожуха	Воздействие агрессивной среды	Нарушение герметичности, потеря тепла, снижение несущей способности
Деформация стальных листов кожуха	Воздействие нагрузки от взрыва	Деформации приводит к выключению из работы стальных листов в качестве элемента жесткости. Обшивка не участвует в работе с несущим каркасом
Деформация стоек каркаса	Воздействие нагрузки от взрыва	Добавочный эксцентриситет равный прогибу конструкции. Увеличение напряжения в элементах до 150 %
Деформация ригелей каркаса	Воздействие нагрузки от взрыва	Добавочный эксцентриситет равный прогибу конструкции. Увеличение напряжения в элементах до 200 %
Деформация связей	Воздействие нагрузки от взрыва	Добавочный эксцентриситет равный прогибу конструкции. Увеличение напряжения в элементах до 300 %
Совокупность дефектов конструкции пода	Воздействие нагрузки от взрыва	Снижение эксплуатационных свойств конструкций печи, невозможность использования для полноценного осуществления технологического процесса
Разрушение футеровки	Воздействие нагрузки от взрыва	Нарушение герметичности, потеря тепла. Невозможность использования для полноценного осуществления технологического процесса

Table 4

The effect of damage on the design of the furnace

Type of defect	Nature of defect	Effect of defect
Corrosion wear on casing upholstery	Exposure to aggressive environments	Lack of tightness, heat loss, reduced load-bearing capacity
Deformation of the steel sheets of the casing	Explosive loading	Deformation leads to the shutdown of steel sheets from work as an element of rigidity. The casing is not involved in the work with the supporting frame
Frame rack deformation	Explosive loading	Additional eccentricity equal to the deflection of the structure. The increase in voltage in the elements to 150%
Skeleton deformation	Explosive loading	Additional eccentricity equal to the deflection of the structure. The increase in voltage in the elements to 200%
Bond deformation	Explosive loading	Additional eccentricity equal to the deflection of the structure. The increase in voltage in the elements to 300%
Set of floor design defects	Explosive loading	Reducing the operational properties of the furnace designs, the inability to use for the full implementation of the technological process
Lining destruction	Explosive loading	Lack of tightness, heat loss. Non-ability to use for the full implementation of the process

Анализ повреждаемости существующих печей показал, что наиболее значимые повреждения силового характера получены в результате взрыва (табл. 4). Данное обстоятельство свидетельствует о том, что конструктивная форма сооружения не обеспечивает в полной мере восприятие взрывных нагрузок в соответствии с требованиями нормативных документов [17–20].

Примечательно, что в работах ряда современных ученых представлены результаты обширных исследований характера изменения НДС каркасов при возникновении такого явления, как прогрессирующее обрушение [21–25]. Анализ опыта расчета каркасов печей показал, что исследования поведения каркасов печей под воздействием взрыва практически не проводятся. В отечественных [18] и зарубежных [12] нормативных документах не приведены методики расчета каркасов печей с учетом взрывного воздействия. По указанной причине перспективным направлением исследования в данной области является изучение поведения каркасов печей на действие особого воздействия от взрыва газозвуковой смеси.

Заключение

По результатам серии расчетов установлено, что влияние повреждений, вызванных эксплуатацией в агрессивной среде, приводит к снижению эксплуатационной пригодности и несущей способности до 50 %; влияние повреждений, обусловленных взрывом ГПВС внутри пространства печи, приводит к снижению несущей способности до 300 %, вплоть до выключения отдельных конструктивных элементов печи из работы.

Установлено, что снижение несущей способности до 300 % вызвано реализовавшимися вследствие воздействия взрывной нагрузки деформациями стрелкой до 150 мм.

Проведенные исследования показали необходимость совершенствовать конструкцию несущего каркаса печи в направлении модернизации технологии и конструктивной формы несущего каркаса печи.

Требуется разработать эффективную конструкцию взрывных окон и оптимизировать несущие конструкции в направлении эффективного сопротивления воздействию взрывных нагрузок.

Список литературы

1. *Timoshenko S.P., Gere J.M.* Theory of Elastic Stability. McGraw, 1963. 560 с.
2. *Вольмир А.С.* Нелинейная динамика пластинок и оболочек. М.: Наука, 1972. 432 с.
3. *Вайнберг Д.В., Вайнберг Е.Д.* Расчет пластин. Київ: Будівельник, 1970. 436 с.
4. *Евзеров И.Д.* Задачи устойчивости для стержней и пластин // Инженерно-строительный журнал. 2014. № 1 (45). С. 6–11. DOI: 10.5862/MCE.45.2.
5. *Лалин В.В., Рыбаков В.А., Морозов С.А.* Исследование конечных элементов для расчета тонкостенных стержневых систем // Инженерно-строительный журнал. 2012. № 1 (27). С. 53–73. DOI: 10.5862/MCE.27.7.
6. *Лалин В.В., Рыбаков В.А.* Конечные элементы для расчета ограждающих конструкций из тонкостенных профилей // Инженерно-строительный журнал. 2011. № 8 (26). С. 69–80. DOI: 10.5862/MCE.26.11.
7. *Dugué J.* Fired equipment safety in the oil & gas industry: A review of changes in practices over the last 50 years // 11th European Conference on Industrial Furnaces and Boilers, INFUB-11. Energy Procedia. 2017. Vol. 120. Pp. 2–19. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.07.151>
8. *Ляшонок С.Ю.* Обзор конструктивных особенностей трубчатых печей // Вестник ИрГТУ. 2013. № 12 (83). С. 213–218.
9. *Ентус Н.Р., Шарихин В.В.* Трубчатые печи в нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности. М.: Химия, 1987. 304 с.
10. Методика определения остаточного ресурса трубчатых печей нефтеперерабатывающих, нефтехимических и химических производств / ВНИКТИнефтехимоборудование. Волгоград, 1998. 34 с.
11. ДиОР-05. Методика диагностирования технического состояния и определения остаточного ресурса технологического оборудования нефтеперерабатывающих, нефтехимических производств / ВНИКТИнефтехимоборудование. Волгоград, 2006. 87 с.
12. ISO 13577-2:2014. Industrial furnaces and associated processing equipment. Safety. Part 2: Combustion and fuel handling systems. 2014. P. 102.
13. *Казенов А.А., Филатов Г.В., Ханин Ю.Д., Мешков В.И.* Трубчатые печи: каталог. 5-е изд., испр. и доп. М.: ЦИНТИХИМНЕФТЕМАШ, 1998. 27 с.
14. Пособие по обследованию и проектированию зданий и сооружений, подверженных воздействию взрывных нагрузок. М., 2000. 121 с.
15. *Бейкер У., Кокс П., Уэстайн П. и др.* Взрывные явления. Оценка и последствия: в 2 кн. Кн. 1 / пер. с англ.; под ред. Я.Б. Зельдовича, Б.Е. Гельфанда. М.: Мир, 1986. 319 с.
16. *Бесчастнов М.В.* Промышленные взрывы. Оценка и предупреждение. М.: Химия, 1991. С. 432.
17. СП 20.13330.2016. СНиП 2.07.07-81*. Нагрузки и воздействия. М.: Стандартинформ, 2016. 103 с.
18. СП 16.13330.2017. СНиП П-23-81*. Стальные конструкции. М.: Стандартинформ, 2017. 140 с.
19. СП 296.1325800.2017. Здания и сооружения. Особые воздействия. М.: Стандартинформ, 2017. 23 с.
20. СП 266.1325800.2016. Конструкции сталежелезобетонные. Правила проектирования. М.: Стандартинформ, 2017. 103 с.
21. *Işık E., Özdemir M.* Performance based assessment of steel frame structures by different material models // Int. J. Steel Struct. 2017. Vol. 17. Pp. 1021–1031. <https://doi.org/10.1007/s13296-017-9013-x>

22. *Hoseini Vaez S.R., Sarvdalir S.* Reliability-Based Optimization of One-Bay 2-D Steel Frame // *KSCE J. Civ. Eng.* 2018. Vol. 22. Pp. 2433–2440. <https://doi.org/10.1007/s12205-017-1881-2>

23. *Pourasil M.B., Mohammadi Y., Gholizad A.* A proposed procedure for progressive collapse analysis of common steel building structures to blast loading // *KSCE J. Civ. Eng.* 2017. Vol. 21. Pp. 2186–2194. <https://doi.org/10.1007/s12205-017-0559-0>

24. *Abdollahzadeh G., Shalika R.* Retrofitting of Steel Moment-Resisting Frames under Fire Loading against Progressive Collapse // *Int. J. Steel Struct.* 2017. Vol. 17. Pp. 1597–1611. <https://doi.org/10.1007/s13296-017-1225-6>

25. *Naji A.* Sensitivity and fragility analysis of steel moment frames subjected to progressive collapse // *Asian J. Civ. Eng.* 2018. Vol. 19. Pp. 595–606. <https://doi.org/10.1007/s42107-018-0045-0>

RESEARCH PAPER

Damage analysis and assessment of the impact of damage on the operation of supporting structures of oil refining tube furnaces

Alexander V. Golikov*, Dmitry I. Subbotin

Volgograd State Technical University, 2 Lenina Ave, Volgograd, 400005, Russian Federation

*alexandr_golikov@mail.ru

Article history:

Received: March 31, 2020

Revised: April 21, 2020

Accepted: April 28, 2020

Abstract

Relevance. Due to the widespread use in practice, tubular furnaces were chosen as the object of study of this work. The article provides an analysis of damage to the supporting structures of oil refining tubular furnaces. The causes of damage and the physical nature of the development of damage are established. According to the results of field surveys, it was found that about 10% of the furnaces are operated with damage in the form of significant curvature of the supporting structures that developed as a result of the explosion of the gas-air mixture and the technological product inside the furnace space. **The aim of the work** is to analyze the damage and assess the impact of damage on the operation of the supporting structures of furnaces. **Methods.** The main research results were obtained by static numerical analysis of spatial models of furnace frameworks in the LIRA-SAPR software package. This complex belongs to the class of software products that implement the finite element method. **Results.** According to the results of calculating a series of models of structures, the effect of damage on the operation of the supporting structures of the furnace is determined. Based on the analysis of calculation data for models of tube furnaces with damage and comparison of calculation results for furnace models with structural damage identified during the survey, ways to optimize the design decisions of an industrial furnace are determined. Studies have shown the need to improve the design of tube furnaces in the direction of improving technology and improving the structural form of the supporting frame of the furnace.

Keywords: industrial furnaces, examination, damage, deformations, stress-strain state

For citation

Golikov A.V., Subbotin D.I. Damage analysis and assessment of the impact of damage on the operation of supporting structures of oil refining tube furnaces. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2020;16(3):193–202. <http://dx.doi.org/10.22363/1815-5235-2020-16-3-193-202> (In Russ.)

References

1. Timoshenko S.P., Gere J.M. *Theory of Elastic Stability*. McGraw; 1963.
2. Volmir A.S. *Nelineinaya dinamika plastinok i obo-lochek [Nonlinear dynamics of plates and shells]*. Moscow: Nauka Publ.; 1972. (In Russ.)
3. Weinberg D.V., Weinberg E.D. *Raschet plastin [Calculation of plates]*. Kiev: Budivelnik Publ.; 1970. (In Russ.)

4. Evzerov I.D. Stability problems for rods and plates. *Engineering and Construction Journal*. 2014;1(45):6–11. DOI: 10.5862 / MCE.45.2. (In Russ.)
5. Lalin V.V., Rybakov V.A., Morozov S.A. The study of finite elements for the calculation of thin-walled bar systems. *Engineering and Construction Journal*. 2012;1(27): 53–73. DOI: 10.5862 / MCE.27.7. (In Russ.)
6. Lalin V.V., Rybakov V.A. Finite elements for the calculation of enclosing structures from thin-walled profiles. *Engineering and Construction Journal*. 2011;8(26):69–80. DOI: 10.5862 / MCE.26.11. (In Russ.)
7. Dugué J. Fired equipment safety in the oil & gas industry. A review of changes in practices over the last

Alexander V. Golikov, Cand. Tech. Sci., senior lecturer, Department of Building Structures, Foundations and Reliability of Structures; eLIBRARY SPIN-code: 1369-7819.

Dmitry I. Subbotin, master student, Department of Building Structures, Foundations and Reliability of Structures; eLIBRARY SPIN-code: 6354-2208.

50 years. *11th European Conference on Industrial Furnaces and Boilers, INFUB-11. Energy Procedia*. 2017;120:2–19. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.07.151>

8. Lyashonok S.Yu., Dyachkova S.G. Obzor konstruktivnih osobennosti trubchatih pechei [Review of design features of tubular furnaces]. *Bulletin of ISTU*. 2013;12(83): 213–218. (In Russ.)

9. Entus N.R., Sharikhin V.V. *Trubchatie pechi v neftepererabativayuschei i neftehimicheskoi promishlennosti* [Tube furnaces in the refining and petrochemical industries]. Moscow; 1987. (In Russ.)

10. VNIKTIneftekhimoborudovanie. *Metodika opredeleniya ostatochnogo resursa trubchatih pechei neftepererabativayuschihih neftehimicheskikh i himicheskikh proizvodstv* [Methodology for determining the residual life of tube furnaces in oil refining, petrochemical and chemical industries]. Volgograd; 1998. (In Russ.)

11. VNIKTIneftekhimoborudovanie. DiOR-05. *Metodika diagnostirovaniya tehnikeskogo sostoyaniya i opredeleniya ostatochnogo resursa tehnologicheskogo oborudovaniya neftepererabativayuschihih neftehimicheskikh proizvodstv* [Technique for diagnosing the technical condition and determining the residual resource of technological equipment of oil refining, petrochemical industries]. Volgograd; 2006. (In Russ.)

12. ISO 13577-2:2014. *Industrial furnaces and associated processing equipment. Safety. Part 2: Combustion and fuel handling systems* (p. 102). 2014.

13. Kazenov A.A., Filatov G.V., Khanin Yu.D., Meshkov V.I. Tube furnaces: Catalog. 5th ed. Moscow: TSINTIHIMNEFTEMASH Publ.; 1998. (In Russ.)

14. Manual for the inspection and design of buildings and structures subject to explosive loads. Moscow; 2000. (In Russ.)

15. Baker W., Cox P., Westine P. et al. *Vzrivnie yavleniya. Ocenka i posledstviya* [Explosive phenomena. Assessment and consequences]. Moscow: Mir Publ.; 1986. (In Russ.)

16. Beschastnov M.V. *Promishlennii vzrivi. Ocenka i preduprezhdenie* [Industrial explosions. Assessment and warning]. Moscow: Khimiya Publ.; 1991. (In Russ.)

17. SP 20.13330.2016. SNiP 2.07.07_81*. *Nagruzki i vozdeistviya* [Loads and impacts]. Moscow: Standartinform Publ.; 2016. (In Russ.)

18. SP 16.13330.2017. SNiP II_23_81*. *Stalnie konstrukcii* [Steel structures]. Moscow: Standartinform Publ.; 2017. (In Russ.)

19. SP 296.1325800.2017. *Zdaniya i sooruzheniya. Osobie vozdeistviya* [Buildings and structures. Special effects]. Moscow: Standartinform Publ.; 2017. (In Russ.)

20. SP 266.1325800.2016. *Konstrukcii stalejezobetonnii. Pravila proektirovaniya* [Steel-reinforced concrete structures. The rules of design]. Moscow: Standartinform Publ.; 2017. (In Russ.)

21. Işık E., Özdemir M. Performance based assessment of steel frame structures by different material models. *Int. J. Steel Struct.* 2017;17:1021–1031. <https://doi.org/10.1007/s13296-017-9013-x>

22. Hoseini Vaez S.R., Sarvdalir S. Reliability-Based Optimization of One-Bay 2-D Steel Frame. *KSCE J. Civ. Eng.* 2018;22:2433–2440. <https://doi.org/10.1007/s12205-017-1881-2>

23. Pourasil M.B., Mohammadi Y., Gholizad A. A proposed procedure for progressive collapse analysis of common steel building structures to blast loading. *KSCE J. Civ. Eng.* 2017;21:2186–2194. <https://doi.org/10.1007/s12205-017-0559-0>.

24. Abdollahzadeh G., Shalika R. Retrofitting of Steel Moment-Resisting Frames under Fire Loading against Progressive Collapse. *Int. J. Steel Struct.* 2017;17:1597–1611. <https://doi.org/10.1007/s13296-017-1225-6>

25. Naji A. Sensitivity and fragility analysis of steel moment frames subjected to progressive collapse. *Asian J. Civ. Eng.* 2018;19:595–606. <https://doi.org/10.1007/s42107-018-0045-0>