

Р.М. Гилимьянов, А.Г. Чиркова

ВЛИЯНИЕ НАУГЛЕРОЖИВАНИЯ ТРУБ ЗМЕЕВИКОВ НАГРЕВАТЕЛЬНЫХ ПЕЧЕЙ НА ИХ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ

Рассмотрено изменение напряженно-деформированного состояния труб змеевиков нагревательных печей, структура которых претерпела изменение в процессе эксплуатации. Проанализирован случай выхода из строя двух смежных подвесок змеевика с последующим развитием потери устойчивости формы трубы. Показано влияние на величину критического осевого усилия различных факторов, не учитываемых действующими нормативами, в том числе пролета трубы, неравномерного нагрева змеевика по высоте, толщины науглероженного слоя.

Трубчатые печи являются одними из основных энергетических агрегатов на установках нефтеперерабатывающих и нефтехимических предприятий. Эксплуатационная надежность и долговечность трубчатых печей влияет на технико-экономические показатели работы всей установки. В свою очередь, работоспособность печи зависит от состояния её конструктивных элементов. Одним из основных узлов, лимитирующих безремонтный пробег печных трубчатых печей, а следовательно и установок в целом, является трубчатый змеевик.

Анализ дефектов [1, 2] позволяет сделать вывод, что для металла змеевиков наиболее характерно образование трещин и развитие остаточных пластических деформаций. Появление дефектов подобного рода вызвано жестким эксплуатационным температурным режимом и конструктивными особенностями печей. Сталь печных труб подвергается диффузионному насыщению углеродом со стороны нагреваемого продукта и отложений кокса в процессе эксплуатации печей. Результатом развития данного процесса является отслаивание металла и утонение стенок труб. Механизм этого явления изучен недостаточно. Ис-

следовательские данные не доведены до расчетных методик, позволяющих оценить НДС змеевика. В связи с этим проведен комплекс исследований труб с различными сроками эксплуатации, включающий в себя микроструктурный анализ, определение твердости и микротвердости, механические испытания [3].

В то же время анализ существующих нормативных документов, регламентирующих проектирование змеевиков трубчатых печей установок нефтеперерабатывающих производств [4, 5], показал, что действующие методики, обязательные к применению проектными организациями, не учитывают при расчете толщин стенок труб и отводов змеевиков влияние ряда немаловажных факторов, в частности:

- геометрию труб змеевика (высоты стояков, пролет между опорами);
- неравномерный нагрев труб по длине змеевика и по сечению вследствие отложения кокса;
- возникновение градиента механических свойств по толщине стенки трубы в силу развития науглероживания и изменение этих свойств со временем.

Для снижения количества отказов змеевиков необходимо выявить основные факторы, инициирующие развитие указанных дефектов, и дать рекомендации по их предупреждению или снижению воздействия.

Наиболее распространенным частным случаем деформированного состояния труб змеевика является продольный изгиб. В то же время в процессе эксплуатации может возникнуть “заклинивание” в паре змеевик – подвеска. Оно обусловлено образованием окалины на поверхностях пары, что ведет к повышению коэффициента трения и торможению движения змеевика по подвеске. При этом возникает нескомпенсированная осевая сжимающая сила, которая, по достижении определенной величины, может вызвать исчерпание несущей способности трубы змеевика, обусловленное потерей устойчивости формы,

задолго до того как величина напряжений в стенке трубы превысит величину предела прочности.

Таким образом, представляет интерес оценить влияние квазимногослойной структуры науглероженной трубы на ее несущую способность, рассматривая гипотетический случай выхода из строя двух смежных подвесок змеевика, выразившегося в невозможности перемещения двух кольцевых сечений трубы. Для достижения поставленной цели была произведена серия расчетов методом конечных элементов в программном комплексе ANSYS.

Расчетная схема участка змеевика, созданная по проекту на печь легкого сырья установки висбрекинга гудрона (рисунк 1), служившей объектом предшествующих исследований [3], представляет собой неразрезную многопролетную балку, изображенную на рисунке 2.

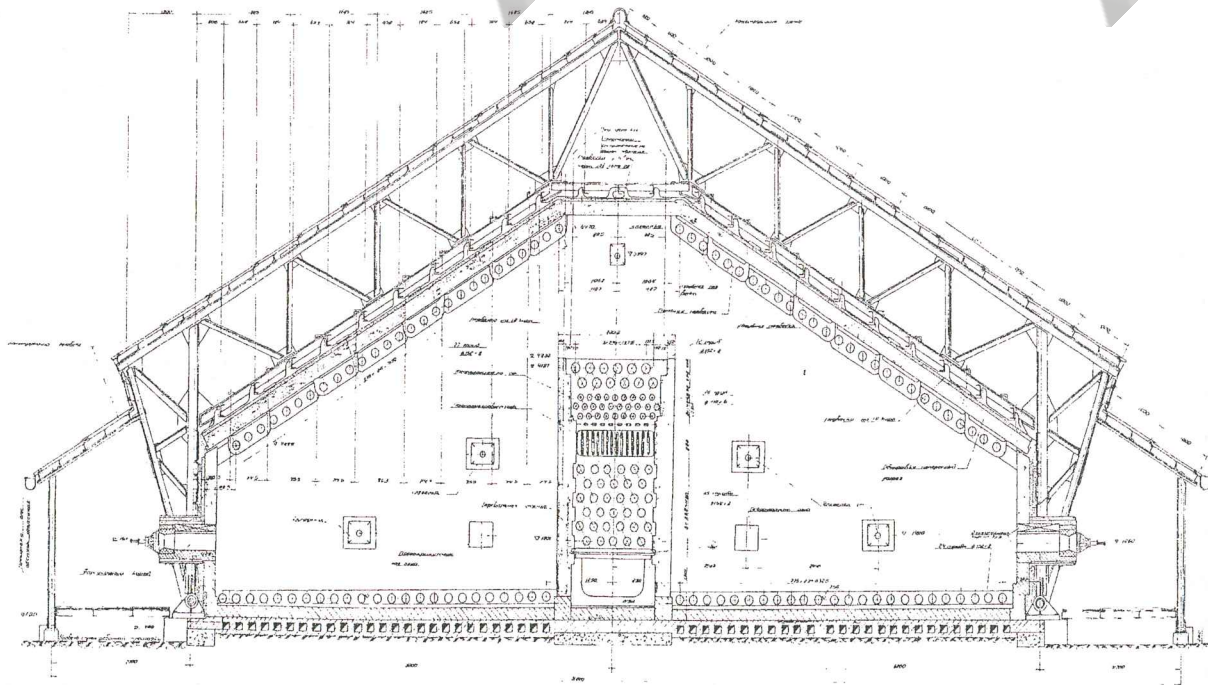


Рисунок 1 – Печь легкого сырья установки висбрекинга

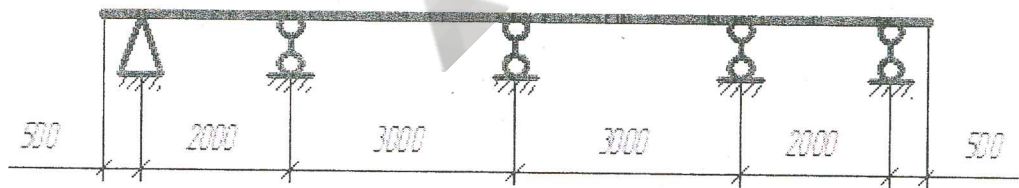


Рисунок 2 - Расчетная схема участка змеевика

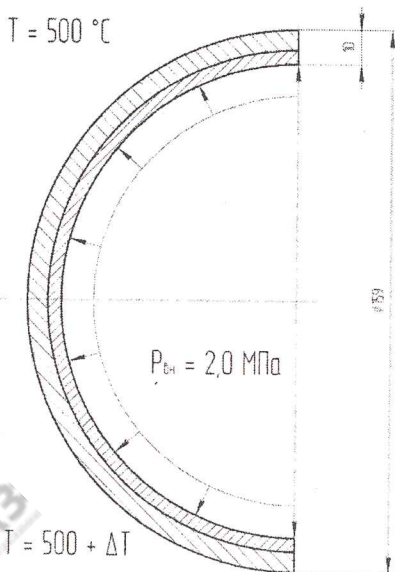


Рисунок 3 – Нагрузки на участок змеевика

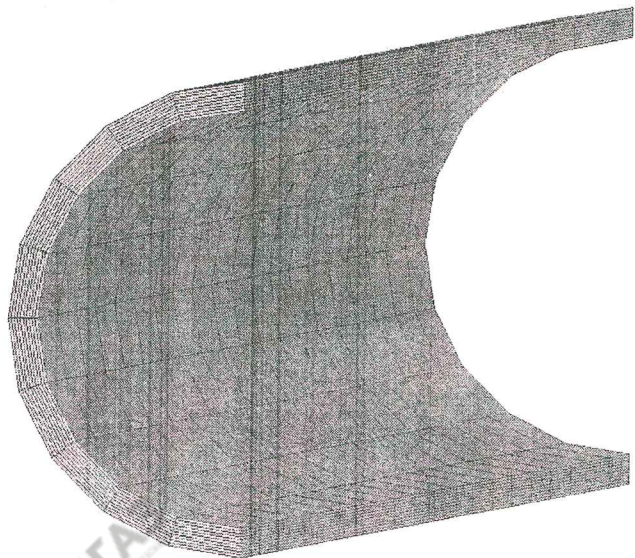


Рисунок 4 - Сетка конечных элементов

Для того чтобы охарактеризовать наиболее общую и универсальную схему поведения деформируемой трубы, в расчете рассматривался лишь один пролет трубы, ограниченный двумя условно “заклиненными” опорами.

К внутренней поверхности трубы приложено равномерно распределенное внутреннее давление, составляющее, согласно технологическому регламенту, 2,0 МПа. Верхняя часть трубы нагрета до $500 \text{ }^\circ\text{C}$, что соответствует температуре продукта на выходе из змеевика. Нижняя часть трубы перегрета относительно верхней на переменную величину ΔT , что соответствует перегреву в результате отложения кокса и неравномерного облучения со сто-

роны факелов горелок. Схема приложенных нагрузок приведена на *рисунке 3*.

В качестве конечного элемента был использован трехмерный восьми узловой структурный твердотельный объемный элемент SOLID185. Было применено регулярное разбиение объемов, число конечных элементов составило 2500. Общий вид конечно-элементного разбиения представлен на *рисунке 4*.

Для расчета были созданы две модели материала, соответствующие основному металлу и науглероженному слою. Каждый из материалов описывался моделью пластичности по Мизесу путем задания следующих параметров как функций температуры:

- модуля линейной упругости;

- коэффициента Пуассона;
- предела упругости;
- касательного модуля (тангенса угла наклона прямой на диаграмме $\sigma - \epsilon$, соответствующей пластической деформации);
- плотности.

Величина температурного коэффициента линейного расширения была принята независимой от температуры.

Средства программного комплекса ANSYS позволяют осуществлять анализ НДС расчетной модели и определение критической нагрузки в условиях развития потери устойчивости формы. Для этого предусмотрено два рабочих режима:

- линейный расчет (eigenvalue buckling);
- нелинейный расчет (nonlinear static analysis).

Первый из них заключается в привлечении заданного количества мод (форм) потери устойчивости формы, присутствующих данной расчетной схеме. Данный метод, как правило, применяется при статическом расчете конструкций, сводимых к системе стержней. Несмотря на кажущуюся простоту, он имеет ряд недостатков, делающих его применение к решаемой в данной работе задаче нецелесообразным, а именно:

- игнорируются нелинейные (упругопластические и пластические) свойства материала;
- критическая сила может быть рассчитана от действия лишь одной нагрузки;
- невозможно отследить закритическое поведение модели, в частности изменение НДС после прохождения нагрузкой своей критической величины.

Второй метод представляет собой частный случай статического анализа

НДС. При этом вводится учет больших деформаций (путем установки системной переменной NLGEOM в состояние ON), устанавливается необходимое количество подшагов приложения нагрузок к модели и число итераций для обеспечения сходимости нелинейного решения.

При проведении расчетов осуществлялось варьирование величинами следующих факторов:

- градиент температуры ΔT , варьировавшийся в пределах от 0 до 500° с шагом в 100° ;
- отношение толщины науглероженного слоя к суммарной толщине стенки трубы, составлявшее от 0 до 0,5 с шагом в 0,1;
- расстояние между неподвижными опорами, принятое равным 5000, 5500, 6000, 6500 и 7000 мм, соответственно.

Для решения поставленной задачи создавались отдельные модели для каждого сочетания длины пролета и отношения толщин слоев. Их общее количество составило 25. Каждая из моделей решалась пятикратно для различных значений ΔT . Распределение поля эквивалентных напряжений для одного из частных случаев (в частности, для $\Delta T = 400^{\circ}\text{C}$ при отношении толщин, равном 0,4) представлено на рисунке 5. Как видно из приведенного рисунка, при достаточно высоких напряжениях на краях трубы, (вблизи закрепления – до 170 МПа) напряжения в середине трубы минимальны (в зоне интенсивного изгиба 68 МПа) при наличии весьма значительных перемещений. Таким образом, в середине трубы, претерпевающей продольный изгиб под действием осевой силы, вызываемой развитием нескомпенсированных температурных деформаций, образуется “пластический шарнир”.

Для определения критической величины осевой сжимающей силы была адаптирована методика, разработанная Д. Мюрреем и применяемая, в частности, для расчета потери устойчивости высокотемпературных заглубленных трубопроводов [6, 7].

Если проанализировать зависимость между прогибом трубы (применительно к данной задаче – вертикальным перемещением Δy верхнего узла среднего кольцевого сечения трубы) и величиной осевой сжимающей силы (в данном случае

– осевая составляющая реакции в зафиксированном узле R_z), то моменту потери устойчивости формы будет соответствовать наибольшее по модулю значение осевой силы. Подобная упрощенная схема приведена на *рисунке 6*.

Данная зависимость для указанного выше частного случая представлена на *рисунке 7*. При этом, как видно из графика, после достижения осевой силой своего максимального значения 61,696 кН, начнется значительный рост перемещений

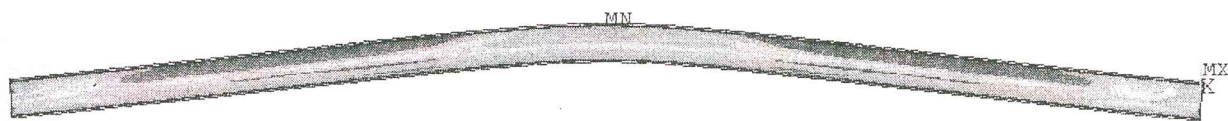


Рисунок 5 – Распределение поля эквивалентных напряжений в объеме трубы

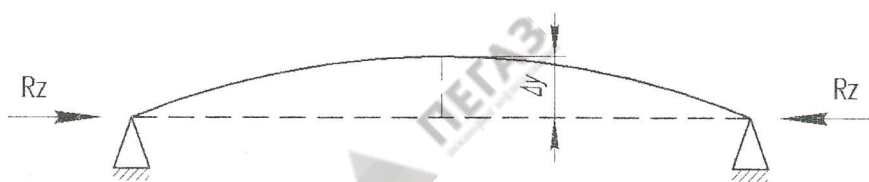


Рисунок 6 – Интерпретация результатов расчета

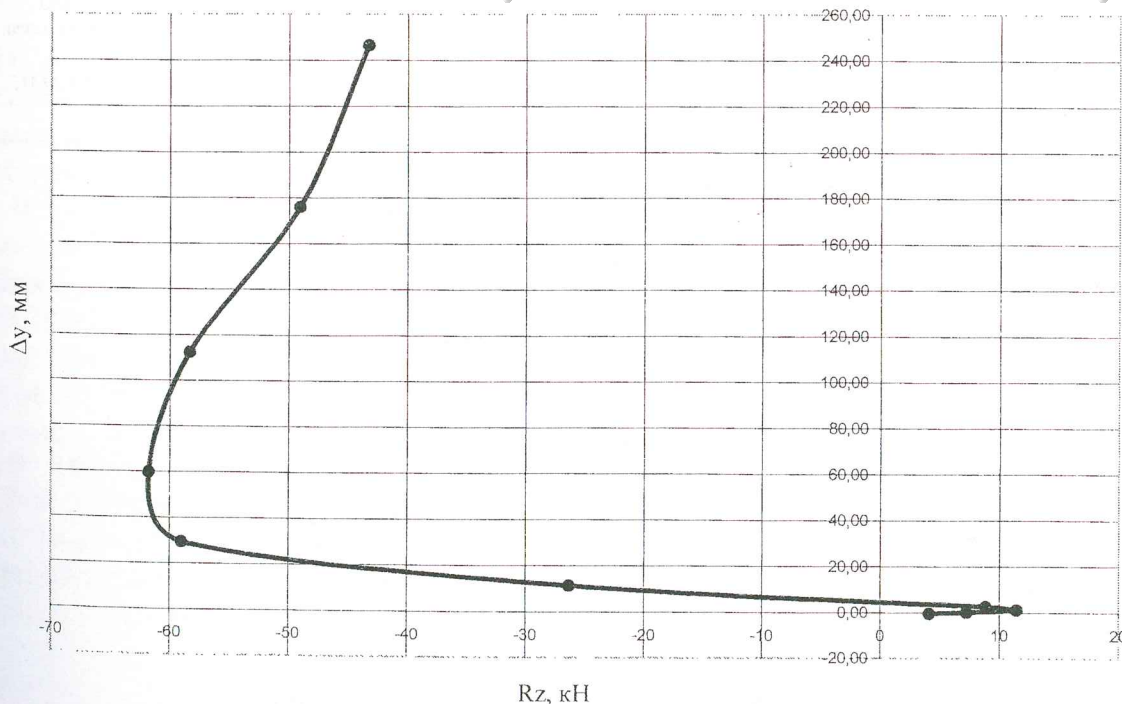
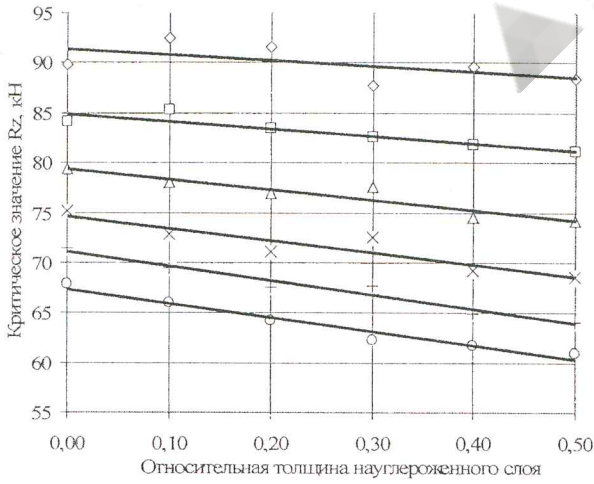
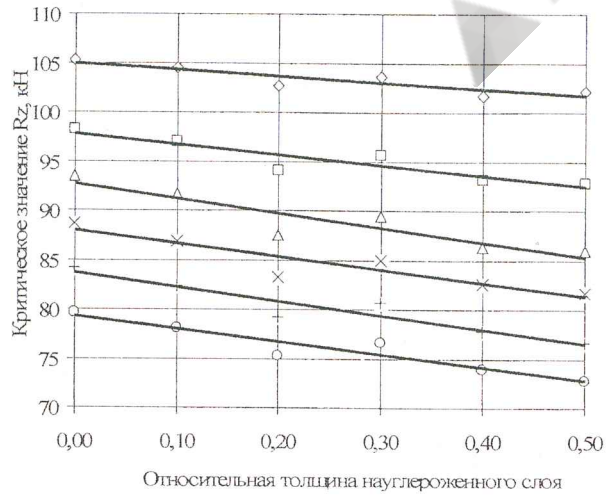


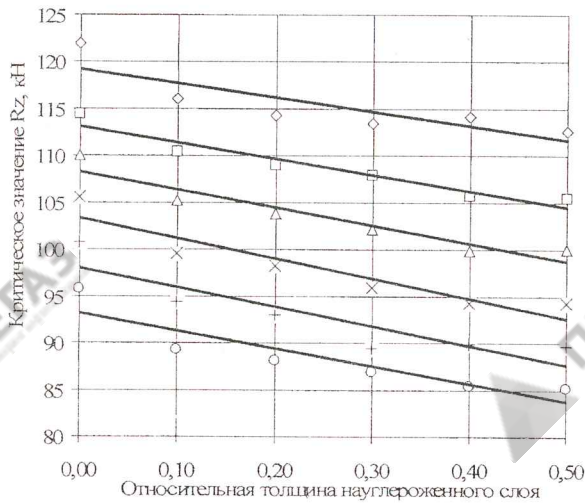
Рисунок 7 – Изменение прогиба трубы и осевой сжимающей силы в процессе развития потери устойчивости формы



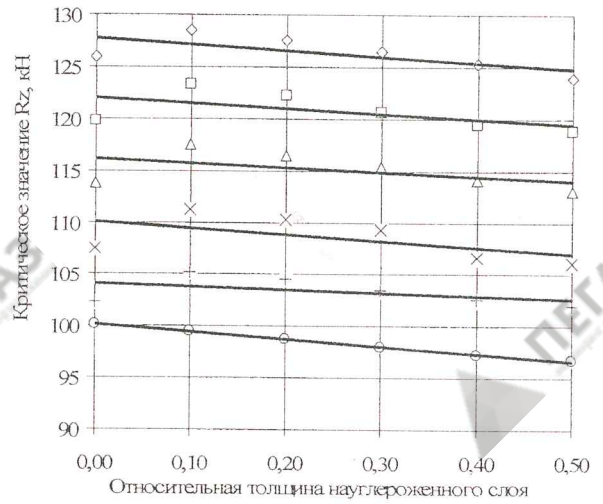
а) пролет участка $L=5000$ мм;



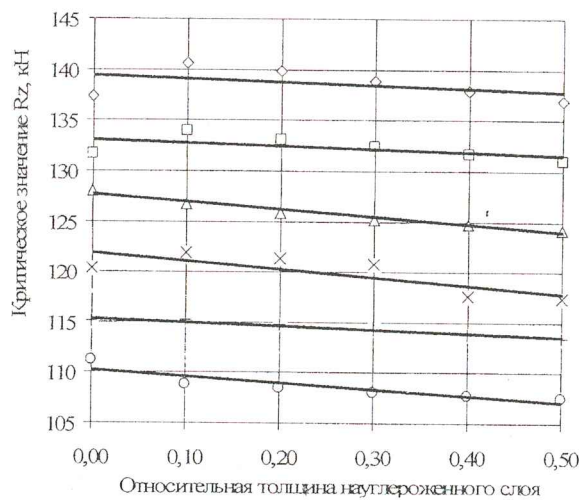
б) пролет участка $L=5500$ мм;



в) пролет участка $L=6000$ мм;



г) пролет участка $L=6500$ мм;



д) пролет участка $L=7000$ мм;

\diamond - $\Delta T = 0^\circ$; \square - $\Delta T = 100^\circ$; Δ - $\Delta T = 200^\circ$;
 \times - $\Delta T = 300^\circ$; $+$ - $\Delta T = 400^\circ$; \circ - $\Delta T = 500^\circ$.

Рисунок 8- Изменение критической сжимающей силы для различных расчетных условий

при снижении величины сжимающей силы, что объясняется началом работы "пластического шарнира". По данному принципу обрабатывались результаты расчетов для всех возможных сочетаний переменных величин, указанных выше.

Графическая интерпретация полученных результатов приведена на *рисунке 8*.

Видно, что для всех значений расстояния между опорами наблюдаются следующие закономерности:

- увеличение градиента температуры ведет к снижению величины критической силы;

- увеличение толщины науглероженного слоя вызывает снижение величины критической силы;

В то же время увеличение расстояния между опорами, при прочих равных условиях, ведет к увеличению критической силы.

Опираясь на полученные результа-

ты, можно рекомендовать следующую последовательность действий при проведении механических расчетов змеевиков трубчатых печей:

1) сбор и анализ исходных данных;
2) определение исполнительной толщины стенки по методике РТМ 26-299-78;

3) определение допускаемой температуры перегрева (относительно технологической) по величинам пролета между опорами и относительной толщины науглероженного слоя.

Таким образом, результаты принятых конечно-элементных расчетов показали необходимость решения при проектировании следующей оптимизационной задачи: учет температурных напряжений при изменении структуры металла, возможности возникновения продольного изгиба труб при стеснении осевых перемещений.

Список литературы

1. И.Р. Кузеев, М.И. Баязитов, Д.В. Куликов, А.Г. Чиркова. *Высокотемпературные процессы и аппараты переработки углеводородного сырья*. - Уфа: Гилем, 1999 – 326 с.
2. Хаерланамова Е.А. *Совершенствование методов расчета и конструирования элементов печей пиролиза / Дисс... канд. техн. наук*. - Уфа: УГНТУ, 2003 – 105 с.
3. Р.М. Гилимьянов. *Изменение структуры и свойств печной трубной стали 12X18H10T при высокотемпературном контакте с коксообразующими углеводородами / Нефтегазовое дело. – 2006. – том 4, №2. – С. 169-172*
4. РД 26-02-80-2004. *Змеевики сварные для трубчатых печей. Требования к проектированию, изготовлению и поставке*. - М.: ВНИИНефтемаши, 2004 - 78 с.
5. РТМ 26-299-78. *Методика расчета на прочность элементов печей, работающих под давлением*. - М.: ВНИИНефтемаши, 1978 - 24 с.
6. D.W. Murray. *Local Buckling, Strain Localization, Wrinkling and Post-Buckling Response of Line Pipe // Engineering Structures, 1997, № 19, N.5, pp. 360-371*
7. R.A. Einsfeld, D.W. Murray, N. Yoosef-Ghodsi. *Buckling analysis of high-temperature pressurized pipelines with soil-structure interaction // J. Braz. Soc. Mech. Sci. & Eng. V.25 N.2 Rio de Janeiro Apr./June 2003, pp. 110-128*

*Чиркова Алена Геннадиевна, к.т.н., доцент кафедры МАХП;
Гилимьянов Рустем Маратович, аспирант кафедры МАХП
Уфимский государственный нефтяной технический университет*