

УДК 629.463.32: 539.372

О причинах деформации обечайки котлов вагонов-цистерн для вязких нефтепродуктов

Л. В. Цыганская¹, Д. Г. Бейн², Н. А. Атаманчук²

¹ Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Россия, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

² АО «НВЦ «Вагоны», Россия, 190013, Санкт-Петербург, Московский пр., 22 литера М, 1-й этаж, помещ. 5н

Для цитирования: Цыганская Л. В., Бейн Д. Г., Атаманчук Н. А. О причинах деформации обечайки котлов вагонов-цистерн для вязких нефтепродуктов // Бюллетень результатов научных исследований. 2024. Вып. 4. С. 24–39. DOI: 10.20295/2223-9987-2024-04-24-39

Аннотация

Цель: существующая проблема выявляемых в эксплуатации повреждений котлов вагонов-цистерн в следствие потери устойчивости требует новых подходов к теоретической и практической оценке возможных причин таких повреждений. Особую актуальность приобретает оценка сочетания различных факторов (в том числе влияния отклонения формы котла при его изготовлении) на возможность потери устойчивости в эксплуатации. **Метод:** для установления причин деформации котлов были проведены расчеты котла на устойчивость. Все расчеты проводились для фактических толщин, определенных по результатам измерений и толщинометрии. Для моделирования была выбрана модель вагона-цистерны с минимальными из измеренных толщинами. Расчеты проводились при действии нормативного значения внешнего давления и при сверхнормативных значениях внешнего давления. **Результаты:** проведенные расчеты устойчивости котла с фактически измеренными толщинами при действии внешнего избыточного давления показали, что потеря устойчивости котла: без отклонения формы от действия нормативного значения внешнего избыточного давления 40 кПа — не установлена; с локальными дефектами от сварки при действии нормативного значения внешнего избыточного давления 40 кПа — не установлена; без локальных дефектов от сварки с глобальным отклонением формы котла при действии избыточного внешнего давления 40 кПа — возможна при значении относительной овальности порядка 2,7 %; без глобального отклонения формы котла — возможна от действия сверхнормативного значения внешнего избыточного давления 79 кПа и выше. **Практическая значимость:** установлены возможные причины потери устойчивости котлов в эксплуатации. Причинами потери устойчивости котла могут быть глобальное отклонение формы котла при наличии относительной овальности порядка 2,7 %; действие сверхнормативного значения внешнего избыточного давления 79 кПа и выше, что возможно при нарушении технологии процесса разгрузки вагона-цистерны; сочетание наличия глобального отклонения формы котла и действия сверхнормативного значения внешнего избыточного давления вследствие нарушения технологии процесса разгрузки вагонов-цистерн.

Ключевые слова: вагон-цистерна, котел вагона-цистерны, потеря устойчивости, коэффициент запаса устойчивости, избыточное давление, коррозия котла, отклонение формы.

Введение

Актуальность работы связана с периодически возникающими в эксплуатации повреждениями котлов вагонов-цистерн, вызванными потерей устойчивости обечайки котла. Периодичность возникновения такого рода повреждений котлов вагонов-цистерн и их опасность для работоспособности котлов отмечены в статье «Оценка устойчивости котла цистерны на основе вариационного принципа Лагранжа» [1].

Повреждения вагонов-цистерн, вызванные потерей устойчивости котла, встречаются в том числе у котлов вагонов-цистерн для перевозки вязких нефтепродуктов. Пример вмятины обечайки котла в зоне паровой рубашки вследствие потери устойчивости показан на рис. 1.



Рис. 1. Вмятина обечайки котла в зоне паровой рубашки вследствие потери устойчивости: *а* — вид вмятины снаружи (паровая рубашка демонтирована);
б — вид вмятины изнутри котла

В работе «Потеря устойчивости котла вагона-цистерны при сливе вязких нефтепродуктов» [2] рассмотрен случай потери формы устойчивости котла вагона-цистерны модели 15-156-01, возможными причинами которого, по результатам работы, являются:

- нижний слив груза самотеком при неисправном или отсутствующем предохранительно-впускном клапане и при наличии коррозии среднего листа глубиной 1,3 мм со стороны паровой рубашки;
- нижний слив груза при закрытой крышке люка при исправном предохранительно-впускном клапане и при наличии коррозии среднего листа глубиной 2,5 мм со стороны паровой рубашки;

– нижний слив груза с помощью насоса при закрытой крышке люка при исправном предохранительно-впускном клапане, даже при отсутствии коррозии котла.

В работе «Анализ причин потери устойчивости котла цистерны при перевозке газоконденсата в зимнее время года» [3] установлено, что потеря устойчивости котла вагона-цистерны возможна при давлении свыше 25 кПа и глубине коррозии 3 мм при снижении температуры атмосферного воздуха до $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Целью настоящей работы являлось установление других (помимо коррозии и нарушения технологии разгрузки) возможных причин необратимых деформаций котлов порожних вагонов-цистерн для перевозки вязких нефтепродуктов, связанных с отклонениями формы котла и сочетанием различных факторов.

Для достижения указанной цели было необходимо:

- 1) провести анализ величины коррозии на соответствие «Нормам...» [4] и ее влияния на устойчивость котла;
- 2) оценить влияние локальных дефектов от сварки на потерю устойчивости котла;
- 3) оценить влияние отклонения формы котла на устойчивость;
- 4) оценить влияние внешнего избыточного давления на потерю устойчивости котла.

Под устойчивостью котла вагона-цистерны понимается способность оболочки котла сохранять форму при действии внешнего избыточного давления и отсутствии притока воздуха внутрь котла (внешнее избыточное давление возникает при условии падения давления внутри котла ниже атмосферного, такое падение возможно при резком изменении наружной температуры и закрытой крышке люка, а также неисправном или временно неработающем предохранительно-впускном клапане).

Задачами исследования являлись:

- 1) выполнение сравнительной оценки для рассматриваемых моделей вагонов-цистерн величин фактической толщины стенок котла цистерны со значениями толщины стенок, определенными в технических условиях и/или в действующем стандарте и требованиях к вагону-цистерне на момент его постройки;

- 2) установление причин потери устойчивости котла вагонов-цистерн путем проведения необходимых исследований вагонов:

– при проведении толщинометрии котла определить влияние изменений локальной толщины стенки обечайки (за счет местных утончений листов обечайки котла в зонах потери устойчивости, визуально видимых пористостей и раковин или других дефектов металла) на деформации цилиндрической части котла, в том числе в месте монтажа паровой рубашки и без нее, показать толщину стенок в зонах, примыкающих к месту деформации;

– методом математического моделирования выполнить расчет устойчивости исследуемых котлов вагонов-цистерн;

– подробно прописать физику процесса возникновения потери устойчивости котла (под действием каких сил это происходит) без потери устойчивости паровой рубашки;

– установить факторы, оказывающие влияние на возникновение деформаций котла, в том числе односторонних деформаций (влияние расположения патрубков в паровой рубашке, характеристики пара, технологии выгрузки — с использованием разогрева груза (с использованием гидромониторов) и/или сверху и т. д.); было ли это вызвано воздействием агрессивной среды изнутри котла или снаружи, под паровой рубашкой.

Исследование вагонов-цистерн для вязких нефтепродуктов из эксплуатационного парка

Согласно результатам технического осмотра и толщинометрии отдельных моделей вагонов-цистерн, были выявлены неисправности:

- деформация обечайки котлов, заплата на среднем листе обечайки котла;
- деформация паровой рубашки;
- коррозия листов котла, которая составляет не более 8,3 % за весь срок эксплуатации вагона или в среднем 0,043 мм/год, что выше рекомендуемого «Нормами...» [4] значения для вагонов-цистерн для нефти и нефтепродуктов (0,04 мм/год).

Проведенные исследования показали, что при данной коррозии без дополнительных факторов при действии нормативного значения внешнего избыточного давления 40 кПа потеря устойчивости котла не происходит.

Для установления причин деформации котлов были проведены расчеты на устойчивость котла. Все расчеты проводились для фактических толщин, определенных по результатам измерений и толщинометрии вагонов-цистерн. Для моделирования была выбрана модель вагона-цистерны с минимальными из измеренных толщинами. Расчеты проводились при действии нормативного значения внешнего давления и при сверхнормативных значениях внешнего давления.

Расчеты проводились в несколько этапов:

– Этап 1: расчет котла без отклонения формы. Цель — определить значение внешнего избыточного давления, при котором возможна потеря устойчивости котла с фактически измеренными толщинами.

– Этап 2: расчет котла с имитацией локальной деформации от сварки (сварочный дефект). Цель — определить влияние локальных сварочных дефектов на потерю устойчивости котла с фактически измеренными толщинами.

– Этап 3: расчет котла с глобальным отклонением формы. Цель — определить влияние глобального отклонения формы (относительной овальности) котла на потерю устойчивости котла с фактически измеренными толщинами.

На рис. 2 представлена первая форма потери устойчивости котла при действии нормативного значения внешнего давления 40 кПа и с фактически измеренными толщинами без сварочных дефектов и без глобального отклонения формы котла.

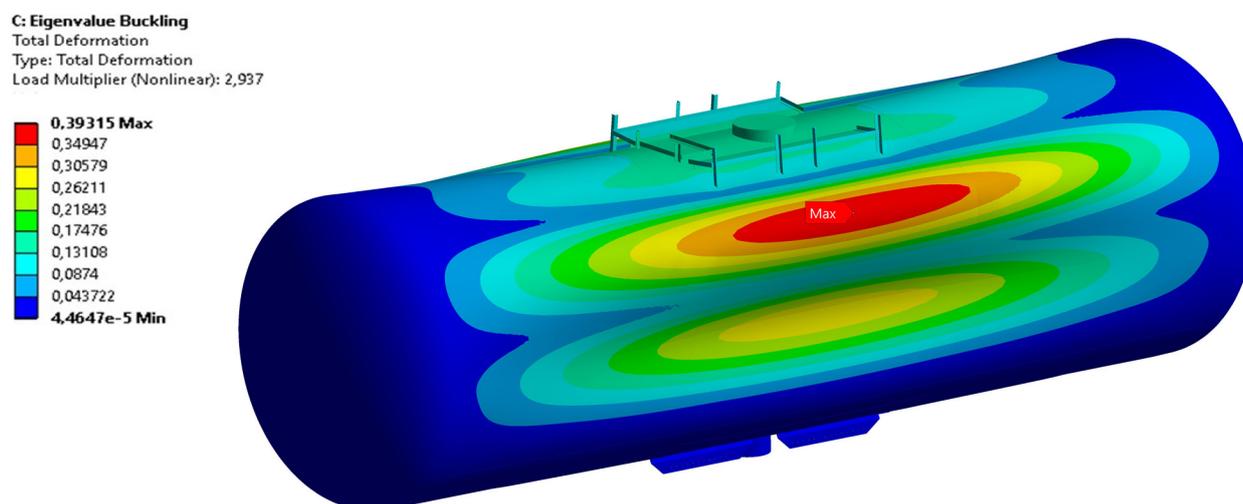


Рис. 2. Первая форма потери устойчивости котла с фактически измеренными толщинами, без сварочных дефектов и без глобального отклонения котла при внешнем давлении 40 кПа, при коэффициенте запаса устойчивости $k_{yc} = 2,937$

Коэффициент запаса устойчивости k_{yc} составил 2,937, что выше минимально допускаемых коэффициентов запаса устойчивости, равных 1,5 в соответствии с ГОСТ 33211 [5] и 1,1 в соответствии с «Нормами...» [4]. Следовательно, котел с фактически измеренными толщинами при действии нормативного значения внешнего давления 40 кПа удовлетворяет требованиям ГОСТ 33211 [5] и «Норм...» [4] в части устойчивости.

Далее для оценки влияния повышения внешнего давления на устойчивость котла были проведены расчеты котла с фактически измеренными толщинами без сварочных дефектов и без глобального отклонения котла на устойчивость при действии сверхнормативного внешнего давления.

Влияние гидростатического давления жидкого груза, находящегося внутри котла и повышающего критическое значение внешнего давления (как это показано в работе [6]), при моделировании не учитывалось.

В табл. 1 представлены расчетные значения коэффициента запаса устойчивости k_{yc} для первой формы потери устойчивости котла с фактически измеренными толщинами без сварочных дефектов и без глобального отклонения котла при действии сверхнормативного значения внешнего давления от 45 до 79 кПа.

ТАБЛИЦА 1. Результаты расчета коэффициентов запаса устойчивости котла k_{yc} с фактически измеренными толщинами без сварочных дефектов и без глобального отклонения котла при действии сверхнормативного значения внешнего давления от 45 до 79 кПа

Значение вакуума, кПа	Расчетное значение коэффициента запаса устойчивости k_{yc}
45	2,502
50	2,267
55	1,867
60	1,629
65	1,427
70	1,255
79	1,105

На рис. 3 представлен график изменения коэффициента устойчивости котла k_{yc} с фактически измеренными толщинами, без сварочных дефектов и без глобального отклонения котла, в зависимости от величины внешнего давления.

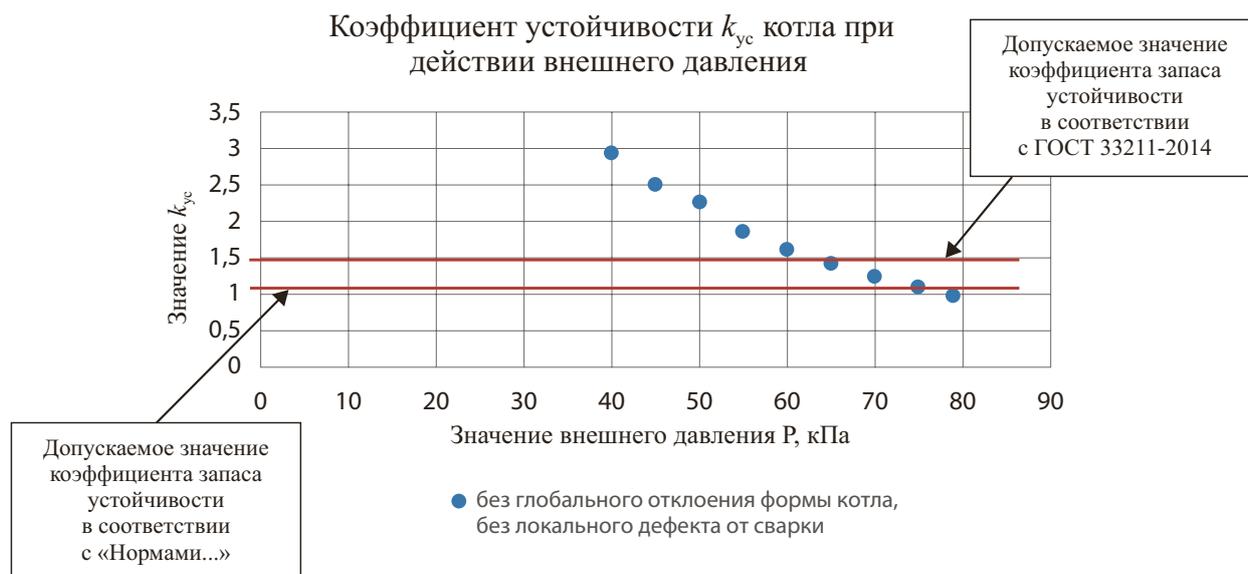


Рис. 3. График изменения коэффициента устойчивости котла k_{yc} с фактически измеренными толщинами, без сварочных дефектов и без глобального отклонения котла, в зависимости от величины внешнего давления

Из графика видно, что при фактических толщинах котла, без сварочных дефектов и без глобального отклонения котла, при действии внешнего давления 65 кПа и выше котел не обладает достаточным коэффициентом запаса устойчивости в соответствии с ГОСТ 33211 [5], а при действии внешнего давления выше 75 кПа не обладает достаточным коэффициентом запаса устойчивости в соответствии с «Нормами...» [5].

При повышении внешнего давления до сверхнормативного значения (до 79 кПа и выше) при фактически измеренных толщинах без сварочных дефектов и без глобального отклонения котла может произойти потеря устойчивости. Это возможно при резком перепаде температуры, как показано в работах [3] и [7].

При этом форма потери устойчивости котла при фактических толщинах котла, без сварочных дефектов и без глобального отклонения котла, при расчетах соответствует фактической форме обмеренных котлов вагонов-цистерн.

Вывод: без наличия сварочных дефектов и без глобального отклонения формы котла с фактически измеренными толщинами потеря устойчивости может произойти от внешнего избыточного давления, равного 79 кПа и выше.

Поэтому далее для выявления причин деформации котла рассматривалось влияние дефектов котла и отклонения формы котла на потерю устойчивости.

В расчете по 2-му этапу для определения влияния локальных сварочных дефектов котла на устойчивость были рассмотрены возможные сварочные дефекты по всей длине обечайки, для чего в расчетной модели была смоделирована вмятина, которая показана на рис. 4.

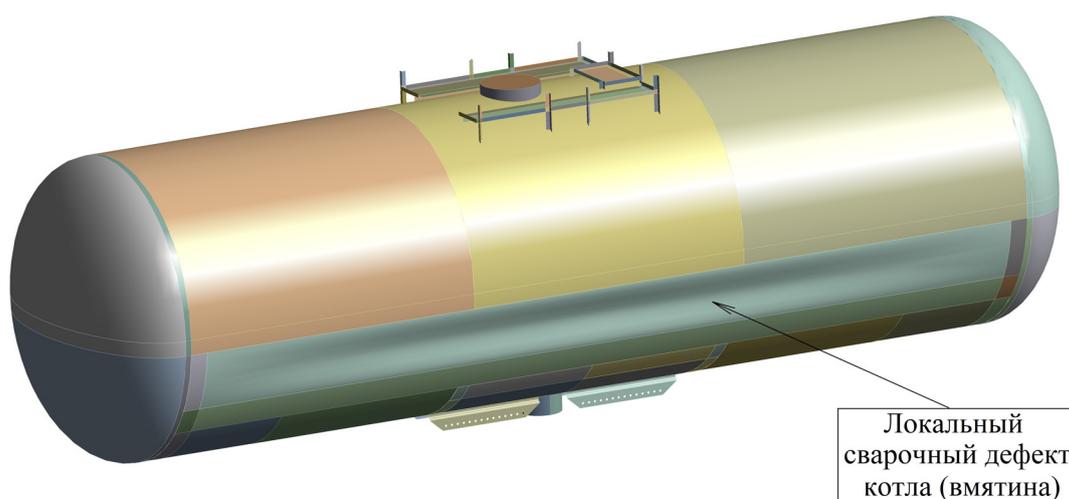


Рис. 4. Расчетная модель котла с возможным локальным сварочным дефектом

Максимальный размер глубины вмятины расположен между паровой рубашкой и средним листом обечайки котла в его центральной части. Форма вмятины выбрана по результатам предварительной оценки различных форм вмятин, при которых происходит изменение коэффициента устойчивости котла k_{yc} от внешнего избыточного давления. Рассматривалось несколько вариантов размера глубины вмятины h : 10 мм, 50 мм, 100 мм, 150 мм. Форма локального сварочного дефекта (вмятины) показана на рис. 5.

Расчеты показали, что наименьшими коэффициентами потери устойчивости обладает модель котла с вмятиной глубиной 100 мм.

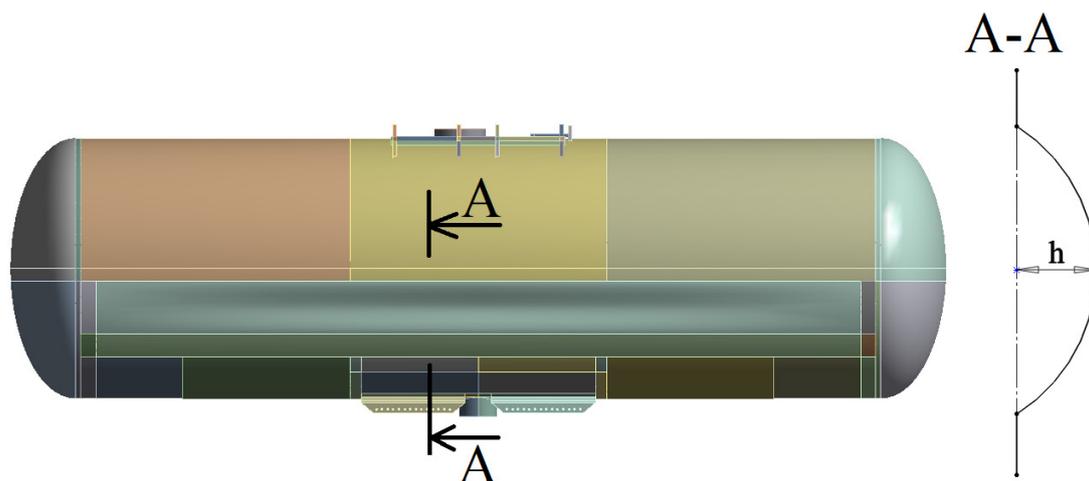


Рис. 5. Форма локального сварочного дефекта (вмятины)

В табл. 2 представлены расчетные значения коэффициента запаса устойчивости k_{yc} для первой формы потери устойчивости котла с локальным сварочным дефектом при действии вакуума от нормативного значения 40 кПа до сверхнормативного 74 кПа.

ТАБЛИЦА 2. Результаты расчета коэффициентов запаса устойчивости котла k_{yc} с локальным сварочным дефектом при действии вакуума от нормативного значения 40 кПа до сверхнормативного 74 кПа

Значение вакуума, кПа	Расчетное значение коэффициента запаса устойчивости k_{yc}
40	2,660
45	2,258
50	1,936
55	1,672
60	1,452
65	1,265
70	1,107
74	0,993

На рис. 6 показан график изменения коэффициента устойчивости k_{yc} в зависимости от величины внешнего давления для котла без локального дефекта от сварки и котла с локальным дефектом от сварки.

Из графика на рис. 5 можно сделать вывод, что с локальным дефектом котла от сварки коэффициент устойчивости котла k_{yc} от внешнего избыточного давления снижается незначительно. При этом деформация при первой форме потери устойчивости появляется также и в зоне локального дефекта от сварки. Потеря устойчивости при нормативном значении давления невозможна.

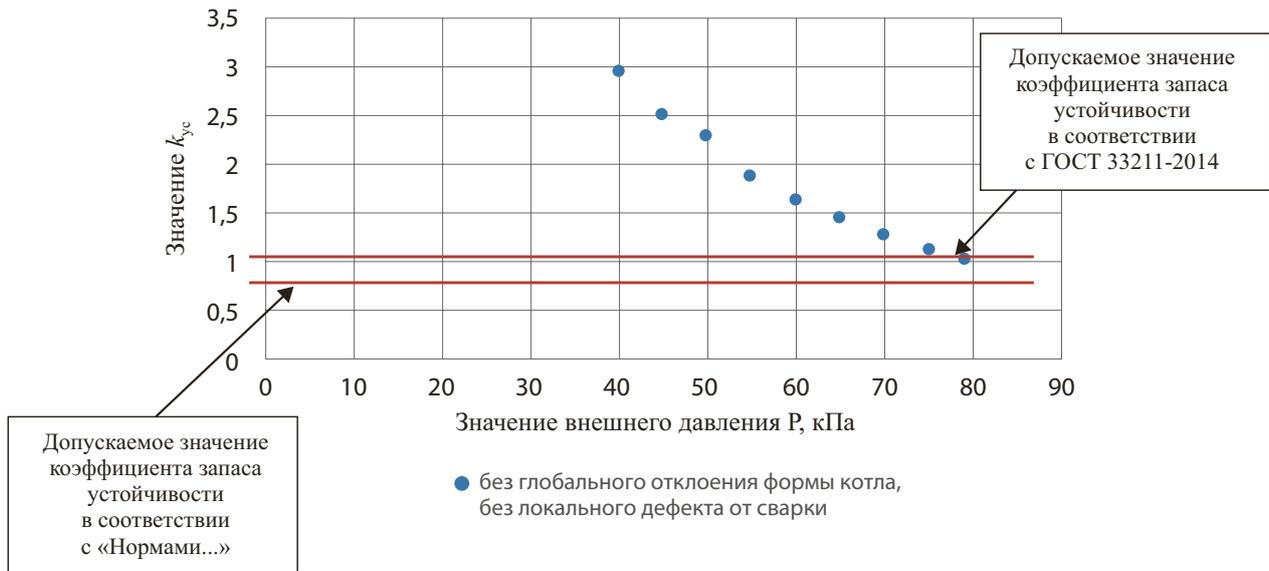


Рис. 6. График изменения коэффициента устойчивости k_{yc} в зависимости от величины внешнего давления для котла без локального дефекта от сварки и котла с локальным дефектом от сварки

Для исследования влияния глобального отклонения формы котла на потерю устойчивости в расчетную схему закладывалось возможное глобальное отклонение формы котла (относительная овальность), показанное на рис. 7.

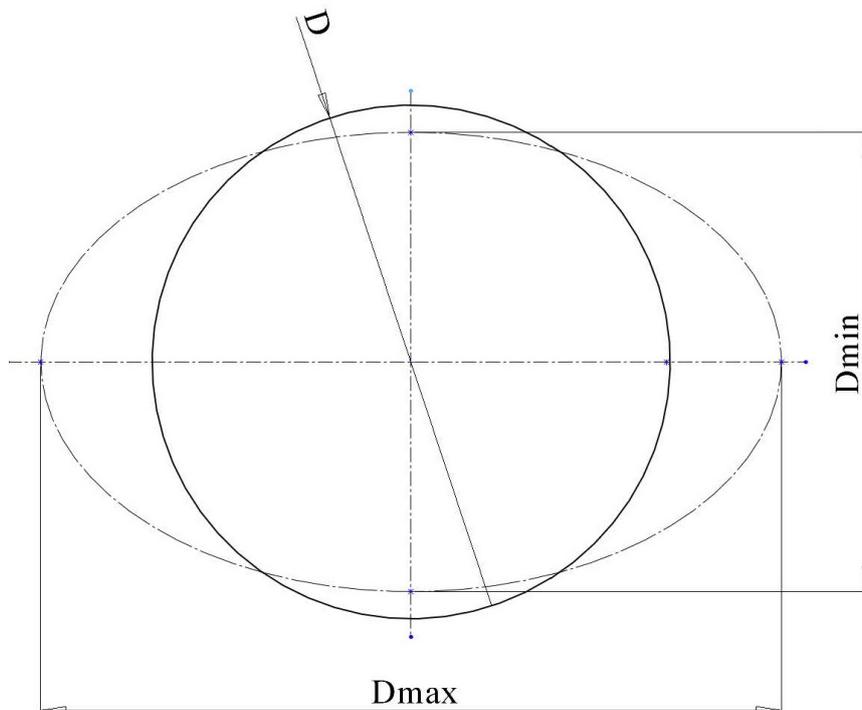


Рис. 7. Глобальное отклонение формы котла

Согласно ГОСТ 34347 [8] относительная овальность корпуса сосудов вычисляется по формуле:

$$a = \frac{2(D_{max} - D_{min})}{D_{max} + D_{min}} 100, \quad (1)$$

где D_{max} , D_{min} — соответственно наибольший и наименьший внутренние диаметры корпуса (мм), измеренные в одном поперечном сечении, как показано на рис. 6.

В табл. 3 приведено несколько случаев возможных относительных овальностей котла, с учетом которых были произведены расчеты.

ТАБЛИЦА 3. Случаи возможных относительных овальностей котла, с учетом которых были произведены расчеты

№ случая	D номинальный внутренний, мм	D_{max}	D_{min}	a , %
1	3000	3020,2	2990,6	0,985
2		3030,6	2985,9	1,486
3		3039,8	2981,6	1,933
4		3055,6	2974,3	2,697

Далее для оценки влияния относительной овальности на устойчивость котла были произведены расчеты котла с фактически измеренными толщинами, без локального сварочного дефекта, с учетом приведенных выше случаев возможных относительных овальностей котла.

Поскольку расчеты устойчивости котла от внешнего избыточного давления производятся для фактических измеренных толщин и с возможными отклонениями формы котла, а в «Нормах...» [4] и ГОСТ 33211 [5] приведены минимально допускаемые коэффициенты запаса устойчивости и не устанавливаются требования к учету отклонения формы потери устойчивости, то в качестве критерия рассматривался случай, когда коэффициент запаса устойчивости менее 1.

В табл. 4 представлены расчетные значения коэффициента запаса устойчивости для первой формы потери устойчивости котла с отклонением формы при действии нормативного значения внешнего давления и максимального сверхнормативного, при котором возможна потеря устойчивости.

В табл. 5 сведены минимальные значения внешнего давления, при которых возможна потеря устойчивости в зависимости от величины отклонения формы котла.

ТАБЛИЦА 4. Результаты расчета коэффициентов запаса устойчивости k_{yc} для первой формы потери устойчивости котла с отклонением формы при действии нормативного значения внешнего давления и максимального сверхнормативного

Значение вакуума, кПа	№ случая	Относительная овальность, %	Расчетное значение коэффициента запаса устойчивости k_{yc}
40	1	0,985	2,142
	2	1,486	1,753
	3	1,933	1,451
	4	2,697	0,992
70	2	0,985	0,997
64	2	1,486	0,987
57	3	1,933	0,996

ТАБЛИЦА 5. Минимальные значения внешнего давления, при котором возможна потеря устойчивости при отклонении формы котла

Отклонение формы котла вдоль поперечной оси, мм, для случая №	Минимальное значение внешнего давления, при котором возможна потеря устойчивости, кПа (значение коэффициента устойчивости ниже 1)
1	70
2	64
3	57
4	40

На рис. 8 представлен график сравнения полученных значений коэффициентов устойчивости k_{yc} для котла без глобального отклонения формы и без локального сварочного дефекта; котла без глобального отклонения формы с локальным сварочным дефектом; котла с глобальным отклонением формы (относительной овальностью).

Из графика, показанного на рис. 7, можно сделать вывод, что при наличии глобального отклонения формы котла (относительной овальности) при действии нормативного внешнего давления 40 кПа коэффициент устойчивости k_{yc} значительно снижается. При этом чем больше величина относительной овальности котла, тем ниже коэффициент устойчивости k_{yc} .

Расчеты устойчивости котла с фактически измеренными толщинами без локального дефекта от сварки с глобальным отклонением формы котла при действии внешнего избыточного давления показали, что потеря устойчивости (коэффициент запаса устойчивости ниже 1) возможна при:

– относительной овальности 0,985 и менее, при этом внешнее давление, при котором возможна потеря устойчивости, должно быть 70 кПа и более;

- относительной овальности 1,486 и менее, при этом внешнее давление, при котором возможна потеря устойчивости, должно быть 64 кПа и более;
- относительной овальности 1,933 и менее, при этом внешнее давление, при котором возможна потеря устойчивости, должно быть 57 кПа и более;
- относительной овальности 2,697 и менее, при этом внешнее давление, при котором возможна потеря устойчивости, составляет 40 кПа и более.

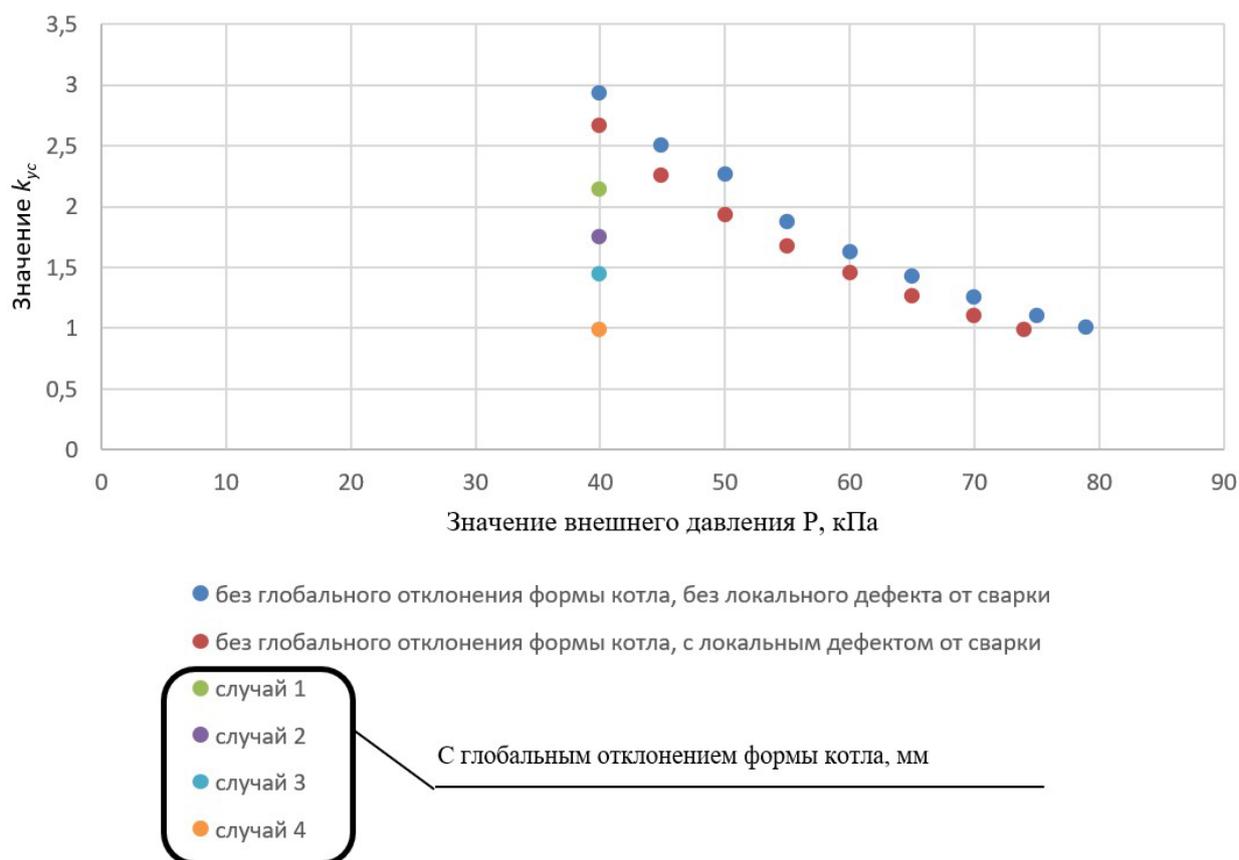


Рис. 8. График сравнения полученных значений коэффициентов устойчивости k_{yc} для котла без глобального отклонения формы и без локального сварочного дефекта и котла с локальным сварочным дефектом и для котла с глобальным отклонением формы (относительной овальностью)

Анализ результатов

Проведенные расчеты устойчивости котла с фактически измеренными толщинами при действии внешнего избыточного давления показали:

- потеря устойчивости котла без отклонения формы от действия нормативного значения внешнего избыточного давления 40 кПа не установлена;
- потеря устойчивости котла с локальными дефектами от сварки при действии нормативного значения внешнего избыточного давления 40 кПа не установлена;

– потеря устойчивости котла без локальных дефектов от сварки с глобальным отклонением формы котла при действии избыточного внешнего давления 40 кПа возможна при значении относительной овальности порядка 2,7%;

– потеря устойчивости котла без глобального отклонения формы котла возможна от действия сверхнормативного значения внешнего избыточного давления 79 кПа и выше.

Следовательно, потеря устойчивости котла может происходить либо при глобальном отклонении формы котла при наличии относительной овальности порядка 2,7%, либо при действии сверхнормативного значения внешнего избыточного давления 79 кПа и выше, либо при сочетании этих факторов.

Заключение

Выявленные в эксплуатации деформации котлов вагонов-цистерн с паровой рубашкой (для перевозки вязких нефтепродуктов) происходят вследствие потери устойчивости.

Причинами потери устойчивости котла могут быть:

1) глобальное отклонение формы котла при наличии относительной овальности порядка 2,7%;

2) действие сверхнормативного значения внешнего избыточного давления 79 кПа и выше, что возможно при нарушении технологии процесса разгрузки вагона-цистерны;

3) сочетание наличия глобального отклонения формы котла и действия сверхнормативного значения внешнего избыточного давления вследствие нарушения технологии процесса разгрузки вагонов-цистерн.

Библиографический список

1. Григорьев П. С., Беспалько С. В., Коржин С. Н. Оценка устойчивости котла цистерны на основе вариационного принципа Лагранжа // Наука и техника транспорта. 2022. № 2. С. 39–46. EDN ANRELI

2. Балалаев А. Н., Жебанов А. В., Коркина С. В. Потеря устойчивости котла вагона-цистерны при сливе вязких нефтепродуктов // Вестник транспорта Поволжья. 2023. № 1(97). С. 7–11. EDN DJKVTN

3. Балалаев А. Н., Жебанов А. В., Коркина С. В. Анализ причин потери устойчивости котла цистерны при перевозке газоконденсата в зимнее время года // Вестник транспорта Поволжья. 2022. № 2(92). С. 7–13. EDN NDKXQZ

4. Нормы для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных). М.: ГосНИИВ-ВНИИЖТ, 1996.

5. ГОСТ 33211-2014. Вагоны грузовые. Требования к прочности и динамическим качествам.

6. Оценка устойчивости цилиндрической оболочки котла цистерны с учетом заполнения ее жидким грузом / П. С. Григорьев [и др.] // Транспорт Урала. 2021. № 4(71). С. 40–45. DOI: 10.20291/1815-9400-2021-4-40-45. EDN HQKDQD

7. Григорьев П. С., Беспалько С. В., Гончаров В. В. Определение критических температур потери устойчивости пологих цилиндрических оболочек // Тепловые процессы в технике. 2021. Т. 13, № 7. С. 324–328. DOI: 10.34759/tpt-2021-13-7-324-328. EDN FHJJCX

8. ГОСТ 34347. Сосуды и аппараты стальные сварные. Общие технические условия (ISO 16528-1:2007, NEQ, ISO 16528-2:2007, NEQ).

Дата поступления: 22.08.2024

Решение о публикации: 10.10.2024

Контактная информация:

ЦЫГАНСКАЯ Людмила Валериевна — канд. техн. наук, доцент кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство»; tcyganskaya@gmail.com

БЕЙН Дмитрий Григорьевич — канд. техн. наук, заместитель главного конструктора; dgbain@mail.ru, dmitry.bein@nvc-vagon.ru

АТАМАНЧУК Наталия Александровна — канд. техн. наук, начальник отдела прочностных расчетов НИБ; nataliya.atamantchouk@nvc-vagon.ru

On the causes of shell deformation in tank car boilers for viscous petroleum products

L. V. Tsyganskaya¹, D. G. Bein², N. A. Atamanchuk²

¹ Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russia

² JSC “Research and Development Center “Vagony”, Office 5N, 1st Floor, 22 Litera M, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190013, Russia

For citation: *Tsyganskaya L. V., Bein D. G., Atamanchuk N. A. On the causes of shell deformation in tank car boilers for viscous petroleum products // Bulletin of scientific research results. 2024. Iss. 4. P. 24–39. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2024-04-24-39*

Abstract

Purpose: the existing problem of detected damages to tank car boilers during operation due to loss of stability requires new approaches to both theoretical and practical assessment of possible causes of such damages. The evaluation of the combination of various factors, including the impact of shape deviation of the boiler during its manufacture, on the possibility of loss of stability during operation is of particular relevance.

Method: to determine the causes of boiler deformation, stability calculations were performed on the boiler. All calculations were conducted for actual thicknesses determined by measurement and thickness gauging.

A tank car model with the minimum measured thicknesses was selected for modeling. Calculations were carried out under the action of the standard external pressure value and under excessive external pressure values. **Results:** stability calculations of the boiler with the actually measured thicknesses under the influence of external excess pressure showed that loss of stability in the boiler: without shape deviation under the action of the standard external excess pressure of 40 kPa was not detected; with local defects from welding under the action of the standard external excess pressure of 40 kPa was not detected; without local welding defects but with a global shape deviation of the boiler under the action of external excess pressure of 40 kPa is possible with a relative ovality of about 2.7 %; without global shape deviation of the boiler, it is possible under the influence of excessive external pressure of 79 kPa and above. **Practical significance:** possible causes of boiler instability during operation were identified. The cause of boiler instability may be a global shape deviation of the boiler with a relative ovality of about 2.7 %; the effect of excessive external pressure of 79 kPa and above, which is possible due to a violation of the tank car unloading process; a combination of global shape deviation of the boiler and the effect of excessive external pressure due to a violation of the tank car unloading process.

Keywords: tank car, tank car boiler, loss of stability, stability margin coefficient, excess pressure, boiler corrosion, shape deviation.

References

1. Grigor'ev P. S., Bepal'ko S. V., Korzhin S. N. Ocenka ustojchivosti kotla cisterny na osnove variacionnogo principa Lagranzha // Nauka i tekhnika transporta. 2022. No. 2. S. 39–46. EDN AN-RELI (In Russian)
2. Balalaev A. N., Zhebanov A. V., Korkina S. V. Poterya ustojchivosti kotla vagona-cisterny pri slive vyazkih nefteproduktov // Vestnik transporta Povolzh'ya. 2023. No. 1(97). S. 7–11. EDN DJKVTN (In Russian)
3. Balalaev A. N., Zhebanov A. V., Korkina S. V. Analiz prichin poteri ustojchivosti kotla cisterny pri perevozke gazokondensata v zimnee vremya goda // Vestnik transporta Povolzh'ya. 2022. No. 2(92). S. 7–13. EDN NDKXQZ (In Russian)
4. Normy dlya rascheta i proektirovaniya vagonov zheleznyh dorog MPS kolei 1520 mm (nesamohodnyh). M.: GosNIIV-VNIIZhT, 1996. (In Russian)
5. GOST 33211-2014. Vagony gruzovye. Trebovaniya k prochnosti i dinamicheskim kachestvam. (In Russian)
6. Ocenka ustojchivosti cilindricheskoj obolochki kotla cisterny s uchedom zapolneniya ee zhidkim gruzom / P. S. Grigor'ev [i dr.] // Transport Urala. 2021. No. 4(71). S. 40–45. DOI 10.20291/1815-9400-2021-4-40-45. EDN HQKDQD (In Russian)
7. Grigor'ev P. S., Bepal'ko S. V., Goncharov V. V. Opredelenie kriticheskikh temperatur poteri ustojchivosti pologih cilindricheskikh obolochek // Teplovye processy v tekhnike. 2021. T. 13, No. 7. S. 324–328. DOI 10.34759/tpt-2021-13-7-324-328. EDN FHJJCX (In Russian)
8. GOST 34347. Sosudy i apparaty stal'nye svarnye. Obshchie tekhnicheskie usloviya (ISO 16528-1:2007, NEQ, ISO 16528-2:2007, NEQ). (In Russian)

Received: 22.08.2024

Accepted: 10.10.2024

Author's information:

Ludmila V. TSYGANSKAYA — PhD in Engineering, Associate Professor of the Department of “Wagons and Wagon Economy”; tcyganskaya@gmail.com

Dmitry G. BEIN — PhD in Engineering, Deputy Chief Designer; dgbain@mail.ru, dmitry.bein@nvc-vagon.ru

Natalia A. ATAMANCHUK — PhD in Engineering, Head of Strength Calculations Department NIB; nataliya.atamantchouk@nvc-vagon.ru