УДК 621.643.2

ОЦЕНКА БЕЗОПАСНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ТРАНСПОРТИРОВКИ НЕФТЕПРОДУКТОВ С ПОЗИЦИИ АНАЛИЗА КРИТЕРИЕВ ПЕРЕХОДА В ПРЕДЕЛЬНОЕ СОСТОЯНИЕ

[1]Диньмухаметова Л.С., [2]Пояркова Е.В., [3]Грехов А.А.

[1]ФГБОУ ВО «Самарский государственный университет путей сообщения», Самара, e-mail: michmen08@yandex.ru;

[2]ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный университет», Оренбург, e-mail: yarko.e@mail.ru;

[3]Южно-Уральская дирекция инфраструктуры – структурное подразделение Центральной дирекции инфраструктуры филиала ОАО «Российские железные дороги», Челябинск, e-mail: aa.grexov@mail.ru

Настоящая статья посвящена оценке изменения критериев наступления предельного состояния вагонов-цистерн для нефтепродуктов в зависимости от длительности эксплуатации. Авторами приводятся результаты многолетнего анализа отказов вагонов-цистерн для светлых нефтепродуктов, эксплуатируемых на сети железных дорог РФ. Проанализировано напряженное состояние вагона-цистерны со светлым нефтепродуктом, и обнаружена локализация нагруженных зон вблизи сварных соединений. Выявлено, что значения напряжений в опасных зонах конструкций цистерн достигают значений, соизмеримых с пределом текучести материала котла (в зоне опирания котла на раму их величина достигает 260 МПа). Для обнаруженного высоконагруженного элемента установлен характер динамики исчерпания прочностного ресурса в процессе эксплуатации. Рассчитаны значения критических размеров дефектов в различных зонах сварного соединения обечайки котла с фасонными лапами исходя из условий статической, ударной и усталостной прочности для различной длительности эксплуатации. Установлено, что для цистерн, отработавших менее 30 лет, наступление предельного состояния в исследуемом элементе определяется условием усталостной прочности, тогда у цистерн с 30-летней наработкой ограничивающим параметром является сопротивление удару. Также отмечается, что при работе цистерны более 20 лет происходит скачкообразное снижение критических размеров трещиноподобных дефектов.

Ключевые слова: сварные соединения, вагоны-цистерны для нефтепродуктов, предельное состояние, несущая способность, критические размеры дефектов

ASSESSMENT OF THE SAFE OPERATION OF EQUIPMENT FOR TRANSPORTING PETROLEUM PRODUCTS FROM THE PERSPECTIVE OF THE ANALYSIS CRITERIA FOR THE TRANSITION IN THE CRUDE STATE

[1]Dinmukhametova L.S., [2]Poyarkova E.V., [3]Grekhov A.A.

[1]Samara State Transport University, Samara, e-mail: michmen08@yandex.ru;

[2]Orenburg state University, Orenburg, e-mail: yarko.e@mail.ru;

[3]South-Ural infrastructure of the branch of JSC «Russian Railways», Chelyabinsk, e-mail: aa.grexov@mail.ru

This article is devoted to the assessment of changes in the criteria for the occurrence of the limit state of tank wagons for petroleum products, depending on the duration of use. The authors provide the results of years of failure analysis of railroad tank cars for light oil, operated on the Railways of the Russian Federation. Analyzed the stress state of the tank with light petroleum, and the localization of loaded zones near welds. It is revealed that the stress values in the hazard area structures tanks reach values comparable with the yield strength of the material of the boiler (in the support zone of the boiler on the frame, their value reaches 260 MPa). For the detected high load element of the nature of the dynamics of the exhaustion of strength resource in the process of operation. The calculated values of critical size defects in different zones of the welded joints of the shells of the boiler with shaped legs based on static, impact and fatigue strength for different durations of operation. It was found that for tanks, spent more than 30 years, the occurrence of limit state in the studied element is determined by the condition of the fatigue strength, then the tanks with 30-year life limiting parameter is the resistance to impact. It is also noted that when the tank is more than 20 years there is an abrupt decrease in the critical size of crack-like defects defects.

Keywords: welded joints, cars cistrana for petroleum products, limit state, bearing capacity, the critical flaw size

Несмотря на предпринимаемые организационно-технические меры, в настоящее время сохраняется достаточно большое число происшествий, связанных с утечками нефтепродуктов при эксплуатации оборудования для их транспортировки. Десятилетний анализ происшествий, имевших место при железнодорожных перевозках продуктов нефтеперерабатывающей отрасли, показывает, что чаще всего инциденты с утечкой нефтепродуктов происходят по причине потери герметичности котлов цистерн из-за появления дефектов сплошности (рис. 1). Данный факт может иметь несколько причин, основной из которых остается недостаточность методологической базы проведения мероприятий по диагностике техниче-

ского состояния, оценке остаточного ресурса и риска, связанного с дальнейшей эксплуатацией оборудования. Это в свою очередь предопределяет необходимость, во-первых, установления критериев перехода конструкций в предельное состояние, а во-вторых, выявления факторов, обусловливающих поведение свойств материала конструкции, формирующие соответствующие критерии.

Целью настоящей работы является оценка критериев наступления предельного состояния вагонов-цистерн для нефтепродуктов в зависимости от длительности эксплуатации.

контроля [3] в соответствии с обобщенной зависимостью вида

$$L_{\max} = f\left\{P^{э}_{\max}; \Phi^{ф}; \delta(D)\right\} \le [L] = \frac{L_c}{n_L};$$

$$T_{к} = \int_{L_0}^{[L]} dL(t; N), \qquad (1)$$

где $L_{\max}$ – максимальный возможный размер повреждения; $P^{э}_{\max}$ – максимальное значение эксплуатационной нагрузки; $\Phi^{ф}$ – обобщенный параметр несущей способности на момент проведения диагностирования; $\delta(D)$ – параметры технического

Рис. 1. Распределение аварийных ситуаций по видам нарушений безопасности вагонов (контейнеров) погрузки ЮУЖД за 2006–2016 гг.

Недостаточная эффективность широко распространенных вероятностных методов оценки ресурса безопасной эксплуатации грузовых вагонов [1, 2] создает предпосылки создания методологической базы индивидуального подхода к анализу безопасности. Поэтому все более широко используются методы, основанные на оценке живучести материала как способности противостоять развитию критических и катастрофических разрушений из-за повреждений, сохраняя ограниченную работоспособность при определенном их уровне в течение ограниченного промежутка времени. Оценка живучести оборудования производится по критериям сопротивления разрушению и сводится к определению максимальных допускаемых размеров повреждений, ресурса и периодичности

состояния по результатам диагностирования; $[L]$ – допустимый (критический) размер повреждения; n_L – коэффициент запаса по соответствующему предельному состоянию; $T_{к}$ – требуемая периодичность контроля; L_0 – исходный размер повреждения; $dL(t; N)$ – скорость развития повреждения по времени t или числу циклов.

В основе метода лежит обнаружение трещин и наблюдение за их развитием с помощью методов неразрушающего контроля (визуального и капиллярного, магнитного и акустической эмиссии). Контролируемый элемент конструкции целесообразно диагностировать на первом этапе жизненного цикла. Для опасных элементов (наиболее нагруженных, имеющих исходные дефекты и/или наиболее подверженных коррозии) следует определить геометрические пара-

метры трещины, гарантирующие необходимое время эксплуатации (например: до следующего технического контроля). Эти параметры являются допускаемыми. С момента обнаружения трещины с критическими параметрами необходимо в течение минимального расчетного времени принять меры по ремонту или снижению рабочих нагрузок на элемент (уменьшение высоты налива продукта, использование гасителей ударов и т.п.). Оценка длительности этого периода определяется на основе анализа предельного состояния конструкции и скорости развития трещин в материале.

Произведены расчеты критической глубины трещиноподобных дефектов в зависимости от срока эксплуатации для обечайки котла цистерны 15-1672 по критериям статической, усталостной прочности и сопротивления хрупкому разрушению в соответствии с ГОСТ 14249-89 с помощью программы Microsoft Office Excel. Максимальная частота разгрузки – 180 раз в год.

Предварительно экспериментальным путем в соответствии с нормами [4] с использованием методики [5] выполнена оценка напряженного состояния отдельных элементов конструкции котла:

– при статических испытаниях выполнялось нагружение внутренним давлением (испытательным $P_{исп}$ = 0,4МПа [4]);

– при динамических – проводилось соударение (аварийное) в груженом состоянии (к заторможенному максимально загруженному вагону прикладывалась сжимающая ударная сила 3МН).

Результаты анализа напряженно-деформированного состояния конструкции котла при проведении нагрузочных испытаний, полученные методом тензометрии, представлены на рис. 2. Показано, что наибольшие значения эксплуатационных напряжений действуют в зоне опирания котла на раму (в месте приварки фасонных лап к обечайке) и составляют около 280 МПа.

При расчете допускаемых и критических размеров дефектов по условиям статической прочности в качестве предельного состояния принималось наступление текучести в нетто-сечении конструктивного элемента, ослабленном трещиной, пользуясь выражениями [6]:

$$\sigma_{пр} = \gamma_c R_y^*, \qquad (2)$$

где γ_c – коэффициент условий эксплуатации; R_y^* – расчетное сопротивление материала.

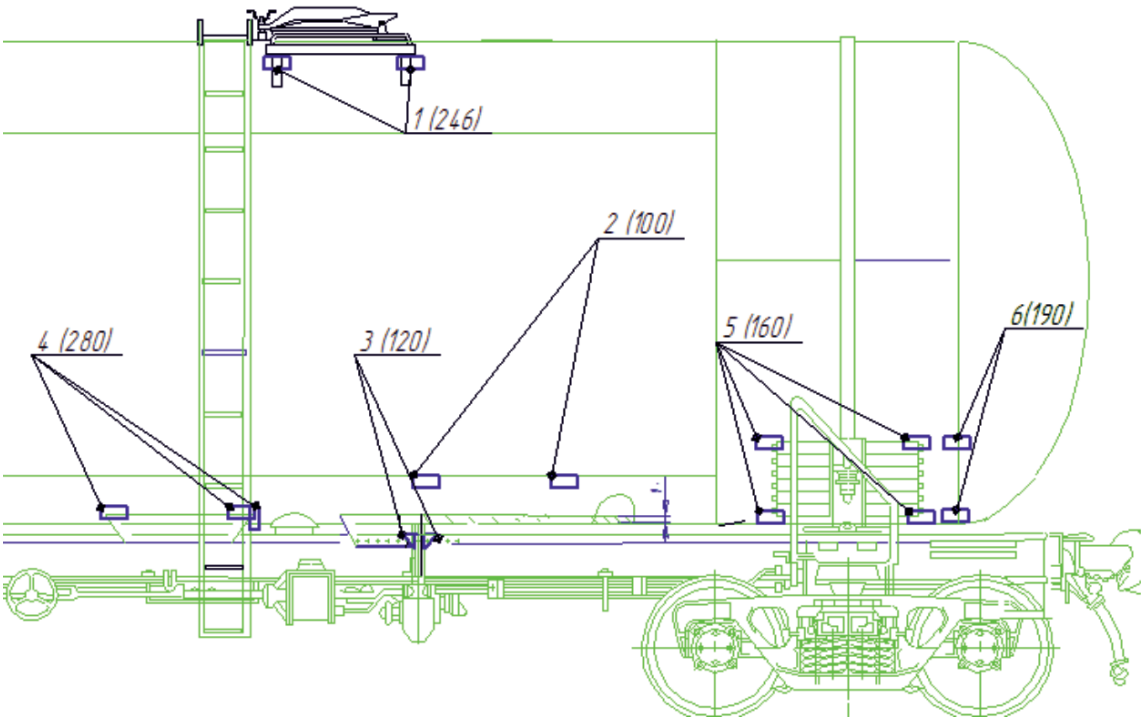

Рис. 2. Максимальные значения эквивалентных напряжений, возникающие в элементах конструкции котла цистерны, МПа. Примечание: *цифрами перед скобкой обозначен условный номер позиции датчиков при тензометрии, цифрами в скобках – искомое значение напряжения в элементе*

При расчете по сопротивлению хрупкому разрушению использовано выражение [6]:

$$K_{\mathrm{I}max} = \frac{\eta\left(\sigma_p M_p + \sigma_q M_q\right)\sqrt{\pi a \cdot 10^{-3}}}{Q} \le K_{Ic},$$

где $K_{I\max}$ – максимальное значение коэффициента интенсивности напряжений, действующих в элементе конструкции; η – коэффициент, учитывающий влияние концентрации напряжений; σ_p – составляющая напряжений растяжения, МПа; $M_p = 1 + 0{,}12\ (1 - a/c)$; $M_q = 1 - 0{,}64\ a/h$; a – глубина трещины, мм; c – полудлина трещины, мм; h – длина зоны, в пределах которой составляющая изгибных напряжений сохраняет положительное значение, мм; Q – параметр, учитывающий геометрию дефекта: $Q = \sqrt{1 + 4{,}6\left(\frac{a}{2c}\right)^{1{,}65}}$; K_{Ic} – статическая трещиностойкость материала.

Расчет критических размеров дефектов из условий сопротивления усталости выполнен согласно неравенству

$$K_{\max} = y_I \sigma_a \sqrt{0{,}71\pi h_{\text{кр}}} \le K_{th}, \qquad (3)$$

где $y_I = 0{,}65$ – коэффициент геометрии трещины для полуэллиптической трещины, направленной вглубь; σ_a – амплитудное значение напряжения.

Для оценки усталостной прочности котла выбирались только те виды нагружения, для которых были выполнимы условия: количество циклов нагрузки мало за срок службы вагона и напряжения превышают предел выносливости материала. По данным фактической эксплуатации цистерн, выполненным прочностным расчетам и согласно [4, 7] установлены распределения максимумов растягивающих и сжимающих продольных сил. Так частота за 1 год эксплуатации для усилий сжатия-растяжения 1МН – 0,289 и 0,269, а число циклов 5058 и 2018 соответственно; число циклов соударения – 38, нагрузка сжимающая 3МН.

В качестве исходных данных при расчетах использованы значения механических свойств контрольных образцов после 5, 15 и 25 лет эксплуатации, а также результаты коррозионных испытаний (среднюю скорость коррозии для различных зон сварных соединений) [8]. При учете геометрии трещиноподобные дефекты идентифицированы в форме эллипсоидов с отношением полуосей 0,7 как наиболее распространенные и опасные с точки зрения локализации напряжений в материале дефекты [6, 9, 10].

Результаты расчетов представлены на рис. 3. Показано, что критерий наступления предельного состояния элемента конструкции с дефектом определяется в зависимости от места нахождения дефекта сварного соединения и срока эксплуатации. При наработке до 30 лет оценку критических размеров дефектов и возможности дальнейшей эксплуатации котла цистерны проводят с использованием условия усталостной прочности. При этом прослеживается, что металл околошовной зоны (ОШЗ) наиболее чувствителен к дефектам и, следовательно, размеры их здесь минимальны: после 25 лет эксплуатации допускаемая глубина дефекта в ОШЗ примерно в 1,5 раза ниже, чем в основном металле. Эксплуатация котла, отработавшего 30 лет, сопряжена с высоким риском его нестабильного разрушения при наличии в околошовной зоне исследуемого сварного соединения трещины длиной в 5 мм. Также отмечается, что значения критических размеров повреждений по мере наработки снижаются более интенсивно на начальном этапе эксплуатации конструкции. Согласно [8, 11, 12 и др.], это связано с существенными изменениями структуры и свойств материала в течение первых трех лет работы конструкции. Для элементов котлов, служащих срок от 5 до 20 лет, изменение критических размеров трещин по мере наработки незначительно. При превышении срока эксплуатации более 20 лет наблюдается снижение сопротивляемости материала конструкции росту трещин усталости, что проявляется резким уменьшением критических размеров повреждений. Так, критическая длина трещины в ОШЗ исследуемого узла цистерны с наработкой в 25 лет оказывается в два раза меньше аналогичной характеристики, рассчитанной для цистерны, отработавшей 20 лет.

Провели анализ статистики отказов, произошедших с вагонами-цистернами погрузки ЮУЖД за 2006–2016 гг. (рис. 4).

Выявлено, что в 46 % случаев возникновение течи имело место у цистерн с наработкой от 20 до 30 лет. Данный факт объясним резким снижением сопротивления материала усталости, а также способности последнего противостоять действию однократных ударных нагрузок высокой интенсивности. Это в свою очередь, может быть связано с интенсивно развивающимися на этой стадии коррозионными процессами [7], вызывающими изменение свойств и деградацию структуры поверхностных слоев материала конструкции, определяющих поведение материалов в условиях действия знакопеременных и ударных нагрузок [13–15].

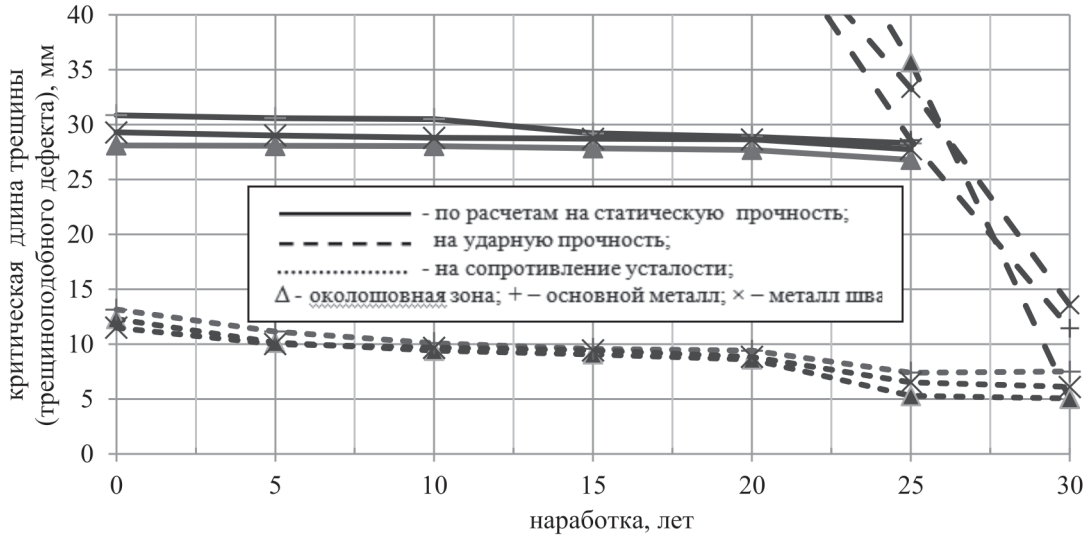

Рис. 3. Критические размеры дефектов, рассчитанные по различным критериям наступления предельного состояния для обечайки котла цистерны в зоне сварного соединения с фасонными лапами

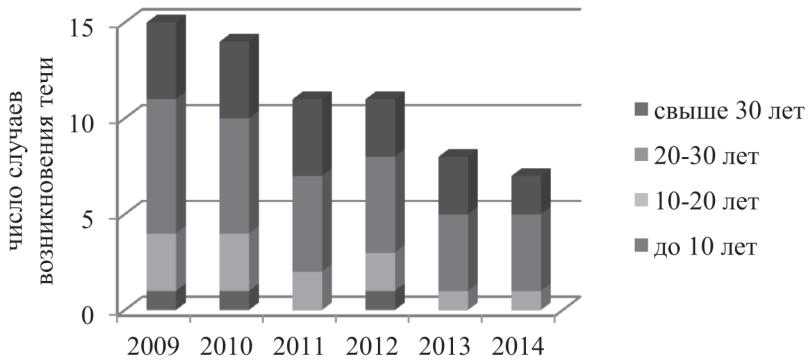

Рис. 4. Число отказов вагонов-цистерн в зависимости от наработки

Заключение

Критерий наступления предельного состояния элемента конструкции с дефектом определяется в зависимости от места нахождения дефекта сварного соединения и срока эксплуатации. При наработке до 30 лет оценку критических размеров дефектов и возможности дальнейшей эксплуатации котла цистерны проводят с использованием условия усталостной прочности. При этом прослеживается, что металл околошовной зоны наиболее чувствителен к дефектам и, следовательно, размеры их здесь минимальны: после 25 лет эксплуатации допускаемая глубина дефекта в ОШЗ примерно в 1,5 раза ниже, чем в основном металле. Эксплуатация котла, отработавшего 30 лет, сопряжена с высоким риском его нестабильного разрушения при наличии трещины длиной в 5 мм в ОШЗ. Отмечается скачкообразное снижение критических размеров трещиноподобных дефектов при наработке 20–25 лет, что, вероятно, обуславливает увеличение числа отказов у цистерн, отработавших более 20 лет.

Список литературы

1. Мажидов Ф.А. Оценка остаточного срока службы грузового вагона с учётом его технического состояния: дис. ... канд. техн. наук / Ф.А. Мажидов. – М., 2016. – 162 с.

2. Третьяков А.В. Управление индивидуальным ресурсом вагонов в эксплуатации: дис. ... д-ра техн. наук / А.В. Третьяков. – СПб., 2004. – 382 с.

3. Махутов Н.А. Оценка сопротивления разрушению и продление ресурса безопасной эксплуатации оборудования, эксплуатируемого в H2S-содержащих средах / Н.А. Махутов, Н.В. Митрофанов, С.Н. Барышов // Материалы V международной научной конференции «Прочность и раз-

рушение материалов и конструкций». – Т. 2. – Оренбург: ИПК ГОУ ОГУ, 2008. – С. 5–21.

4. Нормы расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных). – ГосНИИВ. – М.: ВНИИЖТ, 1996. – 205 с.

5. Воропай В.С. Расчетно-экспериментальный метод обоснования срока эксплуатации вагонов / В.С. Воропай // Вестник ПГТУ. Серия: Технические науки. – 2015. – Вып. 30. – Т. 2. – С. 206–213.

6. Николаев Г.А. Сварные конструкции. Механика разрушения и критерии работоспособности: учеб. пособие / Г.А. Николаев, С.А. Куркин, В.А Винокуров. – М.: Высш. школа, 1982. – 272 с.

7. Бойко А. Расчет прочности котла вагона-цистерны при циклическом нагружении / А. Бойко, О. Кононова // XIII Internation Colloquium «Mechanical fatigue of metals». – С. 484–490. – URL: http://elartu.tntu.edu.ua/bitstream/123456789/16833/2/Conf_2006_Boyko_A-Strength calculation_for_484-490.pdf (дата обращения: 21.05.2017).

8. Кузеев И.Р. Прогнозирование безопасности эксплуатации сварных конструкций в условиях нефтесодержащих сред / И.Р. Кузеев, Л.С. Диньмухаметова, Е.В. Пояркова. // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». – 2011. – № 6. – С. 254–262.

9. Мисейко А.Н. Информационно-измерительная система для обнаружения и локализации развивающихся трещиноподобных дефектов магистральных трубопроводов: Автореферат дис…к.т.н. / А.Н. Мисейко. – Самара, 2008. – 24 с.

10. Фомин М.Н. Оценка усталостной долговечности конструкций при малоцикловом нагружении на базе уравнений механики поврежденной среды: Автореферат дис…кан. тех. наук / М.Н. Фомин. – Н. Новгород, 2011. – 23 с.

11. Пояркова Е.В. Прочность сварных конструкций: учебное пособие / Е.В. Пояркова, Л.С. Диньмухаметова, Ж.Г. Калеева. – Орск: Изд-во ОГТИ (филиала) ОГУ, 2012. – 222 с.

12. Диньмухаметова Л.С. Влияние механической неоднородности на предельную несущую способность сварных соединений из сталей повышенной прочности / Л.С. Диньмухаметова, Е.В. Пояркова // Научно-технический вестник Поволжья. – 2011. – № 6. – С. 160–163.

13. Пояркова Е.В. Эволюция структурно-механической неоднородности материалов сварных элементов конструкций в рамках концепции иерархического согласования масштабов / Е.В. Пояркова: дис. ... д-ра техн. наук: 05.16.09 / Е.В. Пояркова. – Уфа. – 2015. – 392 с.

14. Наумкин Е.А. Методология прогнозирования ресурса нефтегазового оборудования, эксплуатируемого в условиях циклического нагружения, на стадии проектирования и эксплуатации / Е.А. Наумкин: дис. ... д-ра техн. наук : 05.02.13. – Уфа. – 2011. – 210 с.

15. Пояркова Е.В. Причинно-следственная связь возникновения разрушений вагонов-цистерн для перевозки нефтепродуктов / Е.В. Пояркова, Л.С. Диньмухаметова, Н.Я. Подоляк // Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки. – 2016. – Т. 21, № 3. – С. 1263–1266.