

*И. В. Павлов*<sup>1</sup>✉

## **Алгоритм обработки определения вертикальных отклонений стенок стальных резервуаров в зависимости от уровня заполнения нефтепродуктами**

<sup>1</sup> Сибирский государственный университет геосистем и технологий,  
г. Новосибирск, Российская Федерация  
e-mail: pavlov\_nsk@bk.ru

**Аннотация.** Большинство товарных парков на нефтегазовых месторождениях Крайнего Севера находятся в эксплуатации двадцать и более лет. Основу товарных парков составляют вертикальные стальные резервуары, служащие для хранения нефтепродуктов. Геодезический мониторинг данных инженерных сооружений является обязательным и способствует обеспечению их безопасной эксплуатации. Разработанный алгоритм анализа геодезических измерений в полевых условиях позволяет определить деформации вертикальных швов резервуаров с учетом их полного или частичного заполнения. При этом используется классический метод электронной тахеометрии, производится расчет деформационных отклонений резервуара, информация о проблемных швах определяется непосредственно на объекте. Особенность разработанного алгоритма заключается в возможности быстрой адаптации для других инженерных сооружений, например, объектов энергетики и градостроительства. Практическое использование разработанного алгоритма на объектах «Белоруснефть» на Ямале подтвердило актуальность и важность интеграции современных технологий в область геодезического мониторинга.

**Ключевые слова:** резервуар вертикально стальной, вертикально-образующая стенка, тахеометр, мониторинг технического состояния, алгоритм обработки, деформация

*I. V. Pavlov*<sup>1</sup>✉

## **An algorithm for processing the determination of vertical deviations of the walls of steel tanks depending on the level of filling with petroleum products**

<sup>1</sup> Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russian Federation  
e-mail: pavlov\_nsk@bk.ru

**Abstract.** Most of the product parks in the oil and gas fields of the Far North have been in operation for twenty years or more. The basis of the product parks are vertical steel tanks used for storing petroleum products. Geodetic monitoring of these engineering structures is mandatory and helps to ensure their safe operation. The developed algorithm for analyzing geodetic measurements in the field makes it possible to determine the deformations of vertical seams of reservoirs, taking into account their full or partial filling. In this case, the classical method of electronic total station is used, the deformation deviations of the tank are calculated, and information about problematic seams is determined directly at the facility. A special feature of the developed algorithm is the ability to quickly adapt to other engineering structures, for example, energy and urban development facilities. The practical use of the developed algorithm at «Belorusneft» facilities in Yamal has confirmed the relevance and importance of integrating modern technologies into the field of geodetic monitoring.

**Keywords:** vertical steel tank, vertical forming wall, total station, technical condition monitoring, processing algorithm, deformation

## ***Введение***

Резервуары вертикально стальные (РВС) в зависимости от проектируемого объема, степени заполнения, места заложения фундамента под резервуар подразделяют на несколько классов :

- 1 класс КС-3а (РВС объемом более 50 000 м<sup>3</sup>);
- 2 класс КС-3б (РВС объемом 20 000 – 50 000 м<sup>3</sup> включительно, а также резервуары объемом 10 000 – 50 000 м<sup>3</sup> (включительно, расположенные непосредственно по берегам рек, крупных водоёмов и в черте городской застройки);
- 3 класс КС-2а (РВС объемом более 1 000 м<sup>3</sup>, но менее 20 000 м<sup>3</sup>);
- 4 класс КС-2б (РВС менее 1000 м<sup>3</sup>) [1].

Экологическая и техносферная безопасность вертикально-стальных резервуаров, наполненных нефтяными продуктами, подразделяются по трем основным классам:

- особо опасные;
- повышенной опасности;
- опасные.

Резервуары нефтяной компании ООО «Белоруснефть-Сибирь» относятся к 3 классу (КС-2а) и располагаются в зоне повышенной опасности на болотистой местности Крайнего Севера (ЯНАО) в условиях экстремальных температурных перепадов (от 30 °С до минус 40 °С) [2].

Цель статьи заключается в разработке алгоритма для оценки деформации вертикально образующих стенок резервуаров в зависимости от уровня заполнения, сравнения с предельно допустимыми значениями крена каждого шва, выявления пригодности дальнейшего использования резервуаров, а при необходимости, установки дополнительных ребер жесткости.

Для достижения цели необходимо решить следующие задачи:

- разработать алгоритм в программном продукте Excel, позволяющий непосредственно в полевых условиях произвести обработку геодезических данных и выдать рекомендации по дальнейшей эксплуатации или производству ремонтных работ;
- исследовать эффективность разработанного алгоритма и выполнить его апробацию на товарном парке «Белоруснефть» в местах Крайнего Севера.

## ***Методы и материалы***

Проверка геометрической формы и вертикальности стенки проводилась согласно приказу от 23 августа 2023 г. N 305 Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору, исходя из которого учитывался обязательный учет уровня заполнения РВС нефтепродуктом [3].

Для производства геодезических измерений на объектах «Белоруснефть» применялся метод тахеометрической съемки. В качестве технологического оборудования использовались: электронный тахеометр Trimble С5 и светоотражаю-

шие марки, которые были заранее закреплены на стенках резервуаров в пределах 50 мм от пересечения швов.

Для выявления действительной геометрической формы резервуара измерялась величина отклонения вертикали образующей стенки на уровне верха каждого пояса на расстоянии до 50 мм от верхнего горизонтального шва пояса и не реже, чем через 6 м по окружности резервуара.

При использовании метода мониторинга с применением тахеометра количество точек съемочной сети равнялось количеству вертикальных швов. Был обязательно учтен фактор, что точки съемочной сети должны были располагаться строго в створе измеряемого шва. Принцип выполнения работ показан на рис 1.

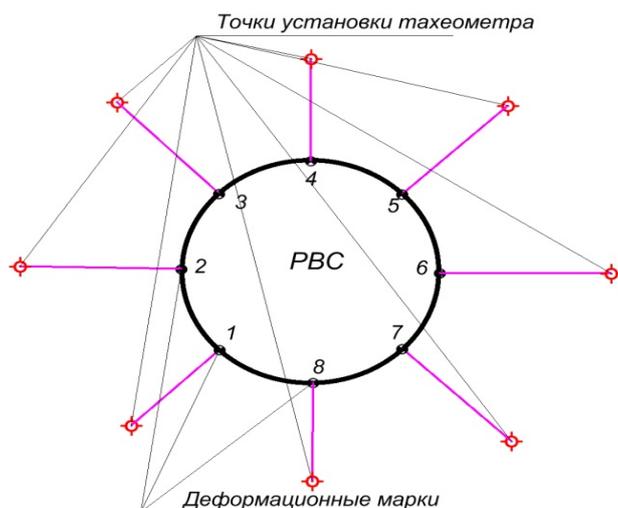


Рис. 1. Схема установки тахеометра при мониторинге PBC

Уровень заполнения резервуаров был различен. Высота нефтепродукта в PBC №4 составила 992 см, в PBC №3 – 0 см.

Схема измерений расстояний показана на рис. 2.

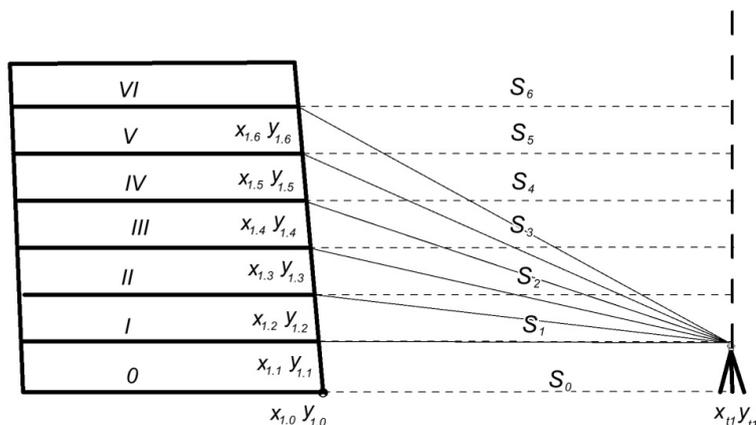


Рис. 2. Схема выполнения тахеометрической съемки PBC

В программном продукте Excel была создана таблица, заполненная формулами для расчета вертикальности образующих стенок, учитывающими допустимые значения высоты швов.

$$S (\text{откл}) = S (\text{г. ш.}) - S (0) \leq f (\text{г. ш.}), \quad (1)$$

$$S (\text{откл}) = S (\text{г. ш.}) - S (0) \geq f (\text{г. ш.}), \quad (2)$$

где  $S (\text{откл})$  – отклонение от вертикальности;

г. ш. – горизонтальный шов каждого уровня высоты;

$S (0)$  – горизонтальное проложение до окрайки днища РВС.

Также в программном продукте Excel было составлено правило условного форматирования, рассчитывающие допустимое отклонение от вычисленного значения. Исходя из этого, ячейка значения, превышающего допуск на заданный по высоте шов, автоматически окрашивается в красный цвет (рис. 3).

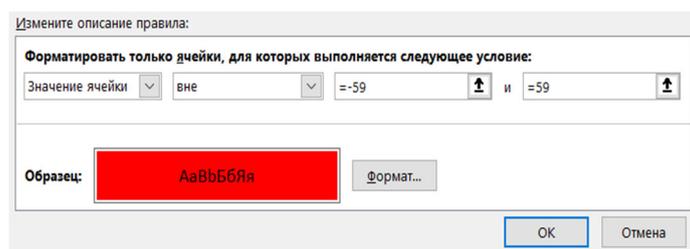


Рис. 3. Создание описания правила для форматирования ячейки

Правило форматирования ячейки было разработано отдельно для каждой высоты сварочного шва. Это обусловлено тем, что, согласно нормативным документам, допуск зависит непосредственно от высоты расположения шва относительно сварного соединения стенки и окрайки днища.

В диспетчере «условного форматирования», правила специально прописали по два раза для каждой ячейки. В результате, обработка геодезических измерений представляется не только в цифровом виде, но и становится интуитивно понятной, так как ячейка окрашивается в один из двух цветов в зависимости от вычисленного значения. Красный цвет показывает превышение допустимых значений, зеленый их отсутствие. Фрагмент представлен на рис. 4.

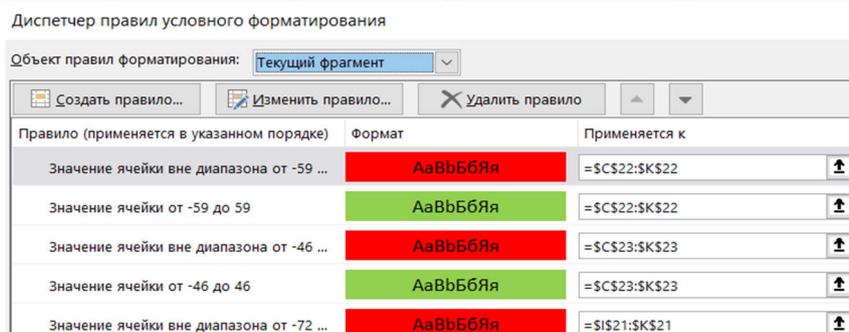


Рис. 4. Диспетчер правил форматирования

Согласно РД 39-117-91 уровень заполнения РВС нефтепродуктами оказывает существенное влияние на вертикальность и крен резервуара. При изменении наполняемости нефтепродуктами происходит существенное перераспределение нагрузки на вертикальные стенки РВС. На верхних поясах высотой более 10 метров наблюдается характер крена всей конструкции [4].

Исходя из этого, в созданном алгоритме определения отклонений вертикальных стенок уровень заполнения был обязательно учтен.

Заключительным этапом создания алгоритма обработки и расчета данных являлась реализация аннотационного всплывающего окна для специалиста, производившего мониторинг.

Краткие рекомендации к дальнейшим действиям позволяют быстро и качественно начать работы по устранению выпучивания и крена резервуара. Всплывающее аннотационное окно показано на рис. 5.

Заполненный РВС

Расчет вертикальности образующей стенки.								
Горизонтальные швы	Высота м.	Вертикальные швы.						
		ДМ59	ДМ60	ДМ61	ДМ62	ДМ63	ДМ64	ДМ65
8	11,92	15	19	88	144	-67	-73	-59
7	10,43	11	10	74	11			48
6	8,94	19	4	55	15	Обнаружена деформация Необходимо передать данные главному инженеру и принять меры по устранению деформационного отклонения РВС, путем установления ребр жесткости и подпорных стоек		
5	7,45	17	17	23	9			
4	5,96	11	23	42	4			
3	4,47	14	0	4	6			
2	2,98	10	11	22	5			
1	1,49	11	7	19	4			13
0	0	0	0	0	0			0
Заключение: Отклонения образующей стенки превышают допустимые значения								
- Значение превышающее допуск.								

Рис. 5. Аннотационное всплывающее окно

## Результаты

Особенность разработанного алгоритма заключается в том, что при различной заполняемости необходимо использовать разные таблицы с допусками (для полного либо частичного заполнения резервуара и для неполного или нулевого его заполнения) [5]. В программном продукте Excel были заданы для удобства восприятия цветовой индикатор получившегося значения. Зеленым цветом отмечены значения, входящие в допуск по отклонению, красным – превышающие допуск.

На рис. 6 и рис. 7 приведены результаты.

Заполненный РВС

Расчет вертикальности образующей стенки.											
Горизонтальные швы	Высота м.	Вертикальные швы.									Допуск мм.
		ДМ59	ДМ60	ДМ61	ДМ62	ДМ63	ДМ64	ДМ65	ДМ66	ДМ67	
8	11,92	15	19	88	144	-67	-73	-59	-41	-128	109
7	10,43	11	10	74	122	-14	-62	-48	-32	-105	99
6	8,94	19	4	55	155	-17	-86	-38	-23	-103	89
5	7,45	17	17	23	99	6	-73	-35	-23	-83	79
4	5,96	11	23	42	42	12	-28	-38	-16	-62	69
3	4,47	14	0	4	86	16	-16	-18	-12	-61	49
2	2,98	10	11	22	56	13	-9	-13	-8	-48	39
1	1,49	11	7	19	40	16	-11	-13	-5	-31	25
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Заключение: Отклонения образующей стенки превышают допустимые значения.											

Рис. 6. Результаты наблюдения отклонений заполненного РВС №4 на 07.24

пустой РВС											
Расчет вертикальности образующей стенки.											
Горизонтальные швы	Высота м.	Вертикальные швы.									Допуск мм.
		ДМ59	ДМ60	ДМ61	ДМ62	ДМ63	ДМ64	ДМ65	ДМ66	ДМ67	
8	11,92	9	19	14	107	-23	-62	-59	-41	-7	91
7	10,43	15	10	18	100	-14	-62	-48	-32	-6	85
6	8,94	19	4	12	98	-17	-54	-38	-23	-3	78
5	7,45	16	7	10	76	6	-41	-35	-23	-3	72
4	5,96	19	5	8	41	12	-28	-27	-16	-2	59
3	4,47	13	0	4	48	16	-16	-18	-12	-2	46
2	2,98	12	1	5	28	13	-9	-13	-8	-4	33
1	1,49	9	-1	5	30	12	-5	-10	-8	-3	20
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Заключение: Отклонения образующей стенки превышают допустимые значения.

Рис. 7. Результаты наблюдения отклонений пустого РВС №4 на 07.24

Тем самым, исходя из года монтажа РВС (его активная эксплуатация производится более 15 лет), анализ данных показал, что главное влияние на деформацию вертикальности образующих стенок оказывают внешние факторы: экстремальные перепады температур, характерные для регионов Крайнего Севера, годовое количество циклов заполнения нефтепродуктами, осадочные грунты с частичными или сплошными многолетнемерзлыми породами, в том числе, с буграми пучения

На рис. 8 представлено выпучивание первого горизонтального шва 10,5 мм на высоте 1,49 метра, находящегося вне допустимого значения вертикально-образующей стенки.



Рис. 8. Выпучивание вертикально-образующей стенки РВС №4

В качестве рекомендаций по устранению дефектов вертикальности и выпучивания РВС можно предложить следующие:

– укрепление стенок дополнительными ребрами жесткости и установление подпорных стоек, которые в свою очередь обеспечат прочность и устойчивость ёмкости, а также для предотвращения дальнейшего крена [5];

– при невозможности наваривания дополнительных элементов либо их неэффективности следует применить демонтаж проблемных металлических листов на участках, превышающих допустимое отклонение вертикальности и выпучивания РВС [6];

– по завершении технических работ следует произвести повторные гидравлические испытания с параллельным геодезическим мониторингом контроля вертикальности, выпучивания и технологической эксплуатации РВС [7].

### ***Заключение***

В рамках проводимого исследования по мониторингу отклонений было обследовано 6 вертикально-стальных резервуаров компании ООО «Белоруснефть-Сибирь».

На данном товарном парке, в Ямало-Ненецком автономном округе, успешно реализована программа мониторинга вертикально-образующих стенок РВС при полном либо частичном заполнении нефтепродуктами.

Разработан алгоритм действий и расчетов в программном продукте Excel, реализованный в качестве автоматического вычисления данных и их выводе в информативно-понятном виде, включающий в себя всплывающие аннотационные окна с рекомендациями в случае отклонения от вертикальности.

Данное исследование позволило сделать выводы и разработать рекомендации об оценке состояния резервуаров и о мерах их пригодности для эксплуатации.

Технологический процесс геодезического мониторинга РВС является одним из основополагающих критериев успешного хранения, переработки и транспортировки нефтепродуктов в рамках соблюдения техносферной безопасности.

Предлагаемый алгоритм мониторинга позволит сократить время, трудозатраты и сметную стоимость на производство работ путем внедрения расчетов и оптимизации обработки данных на программном комплексе, применяемом как в полевых, так и в камеральных условиях.

Разработанный алгоритм может быть актуальным и в градостроительной деятельности, и в сфере энергетики – обследования ЛЭП и дымовых труб.

### **БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Технология геодезического обследования стальных вертикальных резервуаров. ТД 23-115-96 / Утв. 29.01.07 АК Транснефтепродукт.

2. Инструкция по маркшейдерским и топографо-геодезическим работам в нефтяной и газовой промышленности. РД 39-117-91 / Утв. 06.31.91 МНиГ пром. СС.

3. Кашников, Ю. А. Маркшейдерское обеспечение разработки месторождений нефти и газа / Ю. А. Кашников, К. В. Беляев, Е. С. Богданец, А.А Согорин : монография. – Москва : Недра, 2018. – 454 с.

4. Буренков, Д. Б. Моделирование инженерных объектов и оценка точности в геоинформационном пространстве / Д. Б. Буренков, П. П. Мурзинцев, А. В. Полянский, Ю. А. Пупков, Л.

Е. Сердаков – Текст : непосредственный / МГАСУ. – 2006. – 99 с.

5. Кемербаев, Н. Т. Геодезическая информация в системе автоматизированного технического обеспечения и ремонтов / Н. Т. Кемербаев. – Текст : непосредственный // Вестник СГУГиТ. – 2020. – Т. 25, № 4. – С. 27–36. – DOI 10.33764/2411-1759-2020-25-4-27-36

6. Шоломицкий, А. А. Алгоритм определения оседаний днища вертикального стального резервуара по облаку точек лазерных отражений / А. А. Шоломицкий, Н. Т. Кемербаев. – Текст : непосредственный // Маркшейдерия и недропользование. – Март – апрель 2022. – № 2 (118). – С. 33–36.

7. Шинкарев, Б. М. Меры борьбы с выпучиванием концов стыковых швов при автоматической сварке полотниц / Б. М. Шинкарев. - Текст : непосредственный // Автоматическая сварка. – 1951. – № 6. – С. 78-84.

© *И. В. Павлов, 2025*