ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ФОРМЫ И РАЗМЕРОВ ОБРАЗЦА УТОРНОГО УЗЛА РЕЗЕРВУАРА ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ НА ДОЛГОВЕЧНОСТЬ

OPTIMAL SAMPLE SHAPE AND SIZE DETERMINATION OF TANK JUNCTIONAL UNIT FOR MECHANICAL ENDURANCE TESTS

Резервуары вертикальные стальные (РВС) нашли широкое применение в нефтегазовой отрасли. РВС представляют собой сооружения, предназначенные для накопления, хранения, выполнения технологических операций и учета нефти и нефтепродуктов.

Одним из наиболее ответственных элементов резервуара является сварное соединение стенки и окрайки днища — уторный узел. Наличие технологического непрочива в уторном сварном соединении резервуара не позволяет достоверно определять наличие дефектов в узле, возникающих в процессе строительства и эксплуатации, существующими методами неразрушающего контроля. Это в свою очередь накладывает повышенные требования к точности метода определения ресурса узла и размеров допустимых дефектов.

Применяемая на сегодняшний день методика проведения испытания образца уторного узла на малоцикловую выносливость не в полной мере отражает характер распределения напряжений в узле, возникающих от эксплуатационных нагрузок. Одним из недостатков текущей модели является расхождение результатов реального уторного узла и испытательного образца при толщинах стенки близкой или равной толщине окрайки. Также существующая методика не дает представления, по какому участку соединения (стенка-сварной шов, окрайка-сварной шов) произойдет разрушение образца. В результате численного моделирования получены распределения эквивалентных напряжений по внутренней поверхности уторного узла.

В работе предложена конструкция оснастки и испытательного образца, позволяющая увеличить достоверность проводимых испытаний на всех типовых размерах. Предложена новая модель испытания уторного узла на выносливость и оснастка для ее реализации, позволяющая повысить достоверность результатов испытаний по сравнению с существующими образцами для проведения испытаний.

Steel storage tanks are widely used in the oil and gas industry. Steel storage tanks represent the constructions intended for accumulation, storage, performance of technological operations and the account of oil and oil products.

One of the important elements of steel storage tanks is junctional unit between the wall and the bottom of tank.

The lack of fusion at the tank junctional unit does not allow to reliably determine the presence of defects in the assembly that arise during the construction and operation, by existing methods of nondestructive testing. This is, in turn, imposes higher requirements on the accuracy of the method of determining the resource of the tank junctional unit and the size of the permissible defects.

The existing model of the test sample does not allow to reliably reflect the nature of stress distribution at the tank junctional unit, arising from operational loads. There are some drawbacks of the current model. First of all is the discrepancy between the results of the real wrecking unit and the test sample at wall thicknesses close to or equal to the thickness of the edge. The second is the existing technique, there is no definition of which part of the joint (wall-weld, weld-seam welded), and the sample will be destroyed. As a result of the numerical simulation of the distribution obtained equivalent stresses according to the inner surface of the tank junctional unit.

The design of the rigging and the test sample is proposed in this research, which allows increasing the reliability of the tests at all standard sizes. a new model of tank junctional unit testing for endurance and tools for its implementation, allowing you to improve the reliability of the test results compared to existing samples for testing.

Биккинин А. И., Ризванов Р. Г.

ООО «Газпром Инвест»,
г. Санкт-Петербург,
Российская Федерация
Уфимский государственный
нефтяной технический
университет,
г. Уфа, Российская Федерация

A. I. Bikkinin, R. G. Rizvanov

«Gazprom invest» LLC,
Saint-Petersburg,
Russian Federation
Ufa State Petroleum
Technological University,
Ufa, Russian Federation

Ключевые слова:

ресурс, механические испытания, долговечность, надежность, сварной шов, резервуар, уторный узел.

Key words:

resource, mechanical tests, endurance, reliability, weld, oil tank, tank junctional unit.

На сегодняшний день для оценки качества конструкции, определения ее механических и эксплуатационных характеристик, а также в целях выявления причин потери устойчивости широко применяют различные методы испытания как конструкции в целом, так и отдельных узлов.

Механические испытания обычно проводят для возможности определения механических свойств

материала. Такие испытания дают важную информацию о прочностных характеристиках конструкции и сварных соединений. Механические испытания могут проводиться в условиях либо постепенного приложения напряжений (статическая нагрузка), либо ударного нагружения (динамическая нагрузка).

Вертикальные стальные резервуары в процессе эксплуатации находятся под воздействием различных эксплуатационных факторов. Среди них, наряду с коррозионным воздействием среды, основная роль принадлежит малоцикловому нагружению, связанному с технологическими операциями заполнения и опорожнения резервуара.

Многочисленные исследования и анализ статистики отказов показывают, что одним из наиболее нагруженных участков вертикального стального резервуара, вследствие его низкой деформационной способности, является уторный узел (место соединения вертикальной стенки и дна) [1–7]. Усугубляется положение отсутствием достоверных методов по определению наличия дефектов в узле.

Уторный узел РВС представляет собой тавровое сварное соединение (рисунок 1).

Рисунок 1.

Уторный узел резервуара

Для определения ресурса работы уторного узла резервуара проводятся испытания на малоцикловую усталость. Такие испытания имеют цель — исследование поведения металла при циклическом приложении нагрузок и определение предела выносливости узла.

На сегодняшний день в действующих нормативно-технических документах по проведению механических испытаний на малоцикловую выносливость не регламентирована форма и размеры образцов для проведения испытаний данных соединений.

Работы по изучению напряженно-деформированного состояния уторного узла и усовершенствованию его конструкции ведутся достаточно давно. В работе Е. Е. Семина [8] предложена конструкция образца, имитирующего уторный узел, для проведения испытаний на малоцикловую выносливость (рисунок 2). Испытуемый образец представляет собой участок 1 пояса длиной 80 мм и участок окрайки дна 200 мм, и уторный шов. Нагрузка прикладывается в виде растягивающей силы таким образом, что напряжения в зоне уторного шва возникают от моментов.

Для простоты дальнейших разъяснений данный испытательный образец будет именоваться как «Модель 1».

Рисунок 2.

Испытательный образец, имитирующий уторный узел при малоцикловом нагружении, по методике [9]:

1 — стенка резервуара; 2 — окрайка; 3 — элементы для крепления в универсальной испытательной машине

При этом в работе были рассмотрены только два типоразмера образцов с толщинами стенки 28 и 17 мм и окрайки 14 и 11 мм соответственно.

Для подтверждения возможности использования данной конструкции испытательных образцов для других комбинаций толщин стенки и окрайки был проведен ряд проверочных расчетов в программном комплексе ANSYS.

В качестве сравнительного расчета распределения напряжений в уторном узле проведены расчеты на гидростатической модели, соответствующей реальному нагружению резервуара.

Далее были проведены расчеты на испытательном образце. Напряжения снимались по линии ABCD, включая участок AB на внутренней поверхности дна, катет BC внутреннего шва, участок CD на стенке резервуара (рисунок 3).

Рисунок 3.

Линия L (A,B,C,D) снятия величины напряжения в исследуемых образцах

Характерными точками определены линии сплавления дна и сварного шва (точка B) и сварного шва и стенки (точка C). В этих точках наблюдаются локальные максимумы значений напряжения. Сравнение графиков распределения напряжений по линии внутренней поверхности

дает возможность наглядно увидеть отличия между гидростатической расчетной моделью и моделью 1.

Основным отличием модели 1 от гидростатической модели являются: отсутствие опорной площадки для окрайки, наличие дополнительных пластин для фиксации на захватах в испытательной машине и приложение нагрузок под углом к горизонтальной линии (плоскости окрайки).

В результате получены следующие распределения напряжений по внутренней поверхности уторного узла (рисунк 4).

В результате расчетов получено характерное отличие гидростатической модели и модели 1, которое выражается в несовпадении максимальных значений эквивалентных напряжений. В случае с гидростатической моделью максимум наблюдается в точке С (расчеты проводились для

образцов с толщиной стенки и дна равной 9 мм). В случае с моделью 1 максимум наблюдался в точке В.

Данные отличия обусловлены различием схем нагружения в двух рассмотренных вариантах и наличием компенсирующей деформации в крепежных «лапках» модели 1, неизбежно возникающей при проведении испытаний.

С целью получения наиболее достоверных сведений по ресурсу уторного узла на малоцикловую усталость предлагается новый вариант испытательного образца с использованием специальной оснастки для закрепления в универсальной испытательной машине. Для удобства изложения материала наименование предложенного образца принято как «модель 2» (рисунок 5).

С целью определения сходимости результатов расчетов распределения напряжений по внутрен-

Рисунок 4.

Графики распределения напряжений по внутренней поверхности уторного узла:
а) для гидростатической модели; б) модели 1

Рисунок 5.

Оснастка для проведения испытаний модели таврового соединения РВС

ней поверхности уторного узла были рассмотрены 5 типоразмеров испытательных образцов (с типовыми толщинами стенки и днища) для модели 1, модели 2 и гидростатической модели. Предложенные параметры образцов и приложенные нагрузки приведены в таблице 1.

В результате численного моделирования получены следующие распределения эквивалентных напряжений по внутренней поверхности уторного узла (рисунки 6–10).

Основным различием, вызывающим расхождение характеристик распределения напряжений в уторном сварном соединении между реальной моделью и существующим испытательным образцом, является отсутствие площадки, на которую

опирается окрайка. Данная особенность модели 1 позволяет возникающим деформациям значительно снижать уровень напряжений в точке 2, а в случае с равнотолщинными образцами вызывает несовпадение точек максимума величин эквивалентных напряжений.

Выводы

Предложена новая модель испытания уторного узла на выносливость и оснастка для ее реализации, позволяющая повысить достоверность результатов испытаний по сравнению с существующими образцами для проведения испытаний. Достоверность моделирования напряженного состояния в уторном узле повышается на 11,49 %.

Таблица 1.

Результаты расчетов испытательных образцов, имитирующих работу уторного узла РВС

№	Толщина стенки, $S_{\text{стенки}}$, мм	Толщина днища, $S_{\text{днища}}$, мм	Растягивающее усилие, модель 1, Н	Растягивающее усилие, модель 2, Н
1	2	3	4	5
1	9	9	2450	3030
2	10	9	2450	2770
3	13	9	2310	2910
4	22	14	3360	4450
5	28	16	3760	4870

Рисунок 6.

Распределение эквивалентных напряжений по внутренней поверхности узла (толщина стенки 9 мм, окрайки 9 мм)

Рисунок 7.

Распределение эквивалентных напряжений по внутренней поверхности узла (толщина стенки 10 мм, окрайки 9 мм)

Рисунок 8.

Распределение эквивалентных напряжений по внутренней поверхности узла (толщина стенки 13 мм, окрайки 9 мм)

Рисунок 9.

Распределение эквивалентных напряжений по внутренней поверхности узла (толщина стенки 22 мм, окрайки 14 мм)

Рисунок 10.

Распределение эквивалентных напряжений по внутренней поверхности узла (толщина стенки 28 мм, окрайки 16 мм)

СПИСОК ИСПОЛЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 Андреев Я. М. Обеспечение эксплуатационной надежности резервуаров Севера путем повышения выявляемости плоскостных дефектов: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Якутск, 2017. 18 с.

2 Землянский А. А., Вертынский О. С. Опыт выявления дефектов и трещин в крупноразмерных резервуарах для хранения углеводородов // Инженерно-строительный журнал. СПб.: Изд-во Санкт-Петербургский политехнический ун-т Петра Великого. 2011. № 7. С. 40–44.

3 Исследование конструктивных элементов уторного шва резервуаров / А. А. Скорняков, М. З. Зарипов, И. Г. Ибрагимов, А. Л. Карпов, К. Д. Вержбицкий // Нефтегазовое дело. 2014. № 12, № 4. С. 157–161.

4 Скорняков А. А., Файрушин А. М. Совершенствование конструкции уторного узла стального вертикального резервуара // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. 2014. № 2. С. 32–37.

5 Совершенствование технологии изготовления уторного узла стального вертикального резервуара / А. М. Файрушин, О. В. Четверткова, М. З. Ямилев, А. И. Биккинин // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. 2016. № 6. С. 84–87.

6 Модернизация уторного узла стального вертикального резервуара/ Н. Н. Валеев, А. С. Романчук, А. И. Биккинин, М. З. Ямилев, А. М. Файрушин // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. 2016. № 2. С. 18–21.

7 Совершенствование конструкции сварного уторного узла стального вертикального резервуара / А. С. Романчук, Н. Н. Валеев, А. И. Биккинин, Р. Р. Чернятьева // Нефтегазовое дело: электрон. науч. журн. 2017. № 4. С.42-54. URL: http://ogbus.ru/issues/4_2017/ogbus_4_2017_p42-54_RomanchukAS_ru.pdf.

8 Семин Е. Е. Оценка долговечности уторных узлов вертикальных стальных резервуаров в процессе эксплуатации: автореф. дис.... канд. техн. наук. М., 2012. 21 с.

REFERENCES

1 Andreev I. M. Obespechenie ekspluatsionnoi nadezhnosti rezervuarov Severa putem povysheniya vyuyavlyaemosti ploskostnykh defektov: avtoref. dis. kand. tehn. nauk. [Ensuring operational reliability of storage tanks in the North by improving the detectability of Planar defects: katege. Dis. Cand. Tech. Sci.]. Yakutsk, 2017. 24 p. [in Russian].

2 Zemlyanskiy A. A., Vertynskiy O. S. Experience of identifying defects and cracks in large tanks for storage of hydrocarbons. *Inzhenerno-stroitel'nyi zhurnal* — Civil Engineering Magazine. St. Petersburg: St. Petersburg Polytechnic University of Peter the great Publ., 2011, no. 7, pp. 40–44. [in Russian].

3 Skorniyakov A. A., Zaripov M. Z., Ibragimov I. G., Karpov A. L., Verzhbickii K. D. Study of structural elements

junctional unit reservoirs *Neftgazovoe delo — Oil and gas business*, 2014, vol.12, no. 4, pp. 157–161. [in Russian].

4 Skorniyakov A. A., Fajrushin A. M. Improving the design junctional unit steel vertical tank. *Nauka i tehnologii truboprovodnogo transporta nefiti i nefteproduktov — Science and technology of pipeline transportation of oil and oil products*. 2014, no. 2, pp. 32–37. [in Russian].

5 Fairushin A. M., Chetvertkova O. V., Yamilev M. Z., Bikkinin A. I. Improvement of the manufacturing techniques of junctional unit of the steel vertical tank. *Nauka i tehnologii truboprovodnogo transporta nefiti i nefteproduktov — Science and technology of pipeline transportation of oil and oil products*. 2016, no. 6, pp. 84–87. [in Russian].

6 Valeev N. N., Romanchuk A. S., Bikkinin A. I., Yamilev M. Z., Fairushin A. M. Modernization of junctional unit of steel vertical tank. *Transport i khraneniye nefteproduktov i uglevodorodnogo syr'ya — Transportation and storage of petroleum products and hydrocarbons*. 2016, no. 2, pp. 18–21. [in Russian].

7 Romanchuk A. S., Valeev N. N., Bikkinin A. I., Chernyat'eva R. R. Improving the design of welded steel vertical tank junctional unit. *Neftgazovoe delo*, 2017, no. 4, pp. 42–54. [in Russian]. Available at: http://ogbus.ru/issues/4_2017/ogbus_4_2017_p42-54_RomanchukAS_ru.pdf.

8 Semin E. E. *Ocenka dolgovechnosti utornykh uzlov vertikal'nykh stal'nykh rezervuarov v processe ekspluatatsii: avtoref. dis.... kand. tehn. nauk.* [Assessment of the durability of the junctional units of vertical steel tanks during operation: katege. Dis. Cand. Tech. Sci.]. Moscow, 2012, 21 p. [in Russian].

Биккинин А. И., ООО «Газпром Инвест», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация
A. I. Bikkinin, «Gazprom invest», LLC, Saint-Petersburg, Russian Federation

Ризванов Р. Г., д-р техн. наук, профессор, кафедра «Технология нефтяного аппаратостроения» ФГБОУ ВО «УГНТУ», г. Уфа, Российская Федерация
R. G. Rizvanov, Doctor of Engineering Sciences, Professor of the Chair «Oil Equipment Engineering Technology» FSBEI HE «USPTU», Ufa, Russian Federation