Е.В. Луцык, Т.В. Латыпова, В.М. Латыпов, П.А. Федоров (Уфимский государственный нефтяной технический университет, г. Уфа, Российская Федерация)

СОСТОЯНИЕ КОНСТРУКЦИЙ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ РЕЗЕРВУАРОВ ДЛЯ ХРАНЕНИЯ НЕФТИ ПОСЛЕ ДЛИТЕЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Ekaterina V. Lucyk, Tatjana V. Latypova, Valerij M. Latypov,
Pavel A. Fedorov (Ufa State Petroleum Technological University,
Ufa, Russian Federation)

CONDITION OF REINFORCED CONCRETE TANK CONSTRUCTIONS FOR STORING OIL AFTER LONG OPERATION

Введение

В нефтяной отрасли для хранения углеводородного сырья применяются значительное количество полузаглубленных железобетонных резервуаров в сборном и сборно-моноклитном исполнении.

Цели и задачи

Представлен анализ результатов комплексного обследования резервуаров в крупных резервуарных парках для хранения сырой нефти.

Результаты

В статье описаны конструктивные решения железобетонных резервуаров и особенности их эксплуатации.

Приведены результаты оценки технического состояния резервуаров, расположенных на территории Республики Татарстан и Брянской области Российской Федерации.

Описаны методика и результаты натурных испытаний плит покрытий резервуара, которые показали полноценность по несущей способности, жесткости, трещиностойкости и эксплуатационной пригодности относительно проектных решений после длительной эксплуатации в условиях контакта с низко- и среднесернистой нефтью.

Background

In the oil industry, a significant number of semi-buried reinforced concrete tanks in prefabricated and prefabricated monolithic designs are used to store hydrocarbon raw materials.

Aims and Objectives

An analysis of the results of a comprehensive survey of reservoirs in large tank farms for storing crude oil is presented.

Results

The article describes the constructive solutions of reinforced concrete tanks and the features of their operation.

The results of assessing the technical condition of tanks located on the territory of the Republic of Tatarstan and the Bryansk region of the Russian Federation are presented.

The technique and results of full-scale tests of tank cover plates are described, which have shown their usefulness in bearing capacity, stiffness, fracture toughness and serviceability in relation to design solutions after long-term operation under conditions of contact with low- and medium-sulfur oil.

На основе разработанной методики оценки остаточного ресурса железобетонных конструкций резервуаров предложены способы ремонта поврежденных конструкций с целью повышения долговечности резервуаров на срок не менее 15 лет.

On the basis of the developed methodology for assessing the residual life of reinforced concrete structures of tanks, methods of repairing damaged structures are proposed in order to increase the durability of tanks for a period of at least 15 years.

Ключевые слова: резервуары для хранения сырой нефти; условия эксплуатации; агрессивность среды; обследование технического состояния; испытания плит; коррозионные повреждения

Keywords: crude oil storage tanks; terms of Use; aggressiveness of the environment; inspection of the technical condition; slab testing; corrosion damage

Резервуарный парк системы сбора, хранения и транспорта нефти наряду с металлическими надземными резервуарами включает значительную долю полузаглубленных железобетонных резервуаров в сборном и сборно-монолитном исполнении [1-4].

Одной из особенностей эксплуатации этих ответственных в экологическом отношении объектов является трудность своевременного освидетельствования их технического состояния, что обусловлено необходимостью полной очистки внутреннего пространства от парафиновых отложений и последующей дегазации.

В связи с этим, периодичность полного технического обследования резервуаров регламентируется нормативами [5] и зависит также от категории технического состояния конструкций, определенной предыдущим обследованием.

Так, для резервуаров, имеющих категорию I (техническое состояние «Исправное»), следующее полное обследование должно проводиться в срок, не превышающий 10 лет, тогда как для категории III (техническое состояние «Ограниченно работоспособное») этот срок сокращается до 3-5 лет.

Специалистами Уфимского государственного нефтяного технического университета проведены работы по комплексному обследованию резервуаров в крупных резервуарных парках для хранения сырой нефти в Республики Татарстан и Брянской области (Россия). При этом оценивалось техническое состояние строительных конструкций прямоугольных и цилиндрических резервуаров емкостью 10 и 30 тыс. м³, эксплуатировавшихся с начала 1960-х годов XX века (таблица 1).

Несущий остов резервуаров образован сборными наружными стенками с замоноличенными стыками, внутренними колоннами и монолитным днищем.

Покрытие прямоугольного резервуара представлено ребристыми плитами размером 1 x 5 м, уложенными на ригели в ячейках 5 x 5 м во взаимно-перпендикулярном направлении.

Цилиндрические резервуары, в свою очередь, подразделяются по конструкции на две группы. Покрытие резервуаров первой группы образовано ребристыми Т-образными секторными плитами пролетом 18 м, опирающимися в центре на железобетонный контур в виде шестигранника. Покрытие ре-

резервуаров второй группы выполнено из ребристых П-образных секторных плит пролетом 5.8-7.0 м, опирающихся в середине на два ряда кольцевых балок, а по краям - на центральную колонну с капителью и наружную стенку.

В результате обследования резервуаров установлено, что техническое состояние конструкций зависит от места их расположения относительно уровня налива нефти: ниже этого уровня железобетон практически не имеет следов коррозионного воздействия среды, тогда как в вышерасположенных конструкциях обнаружена коррозия арматуры и локальные повреждения защитного слоя бетона. Хорошая сохранность тонкостенных ребристых плит при длительном сроке их эксплуатации в условиях воздействия средне- и сильноагрессивной сред обусловлена высоким качеством бетона (таблица 2): его низкой проницаемостью (водопоглощение бетона лишь на локальных участках незначительно превышает значение 4.2 %), оптимальным гранулометрическим составом и качеством заполнителя, а также применением высокомарочного цемента (по результатам испытаний прочность бетона плит на сжатие в среднем на 35-40 % выше проектной). Кроме того, заметное экранирующее действие оказывает слой парафиновых отложений, фактически образующих на поверхности конструкций защитное покрытие барьерного типа. Так, толщина слоя парафина на днище цилиндрического резервуара до его очистки превышала 2 м. Обнаруженные при обследовании повреждения конструкций покрытия (плит, балок и оголовков колонн) обусловлены проявлением коррозии карбонизации. Однако степень повреждения наиболее ответственных конструкций – ребристых плит покрытия – незначительна: глубина карбонизации в среднем в 1.5-2.0 раза меньше толщины защитного слоя бетона для рабочей арматуры, конструктивная же арматура и арматура полок плит, имеющая малую толщину защитного слоя, повреждена коррозией на площади до 20 % от общей площади покрытия. Относительно малая глубина карбонизации за длительный период эксплуатации обусловлена следующими причинами: высокой влажно-

стью воздуха внутри резервуара (около 100 %), относительно низкой температурой (температура нефти составляет от 3 °С до 25 °С в зависимости от сезона), а также достаточно высокой плотностью бетона.

Одним из главных условий работоспособного состояния цилиндрических резервуаров является сохранение уровня предварительного напряжения в стенках за счет их обжатия кольцевой арматурой навивки. В результате сканирования прибором «FERROSCAN» и обследования из шурфов установлено отсутствие каких-либо механических или коррозионных повреждений в этой арматуре и хорошая сохранность слоя торкрет-раствора.

При изучении механических характеристик материалов используются как неразрушающие, так и разрушающие методы контроля. При испытании конструкций нагружением до разрушения можно наиболее достоверно определить не только данные по фактической несущей способности конструкций (ее прочности, жесткости и трещиностойкости), но и фактические коэффициенты запаса. Порядок проведения таких испытаний регламентирован ГОСТ 8829-2018 [6]. Помимо определения несущей способности конструкций при разрушающем методе контроля устанавливается фактическая толщина защитного слоя и определяются параметры армирования.

Для изучения особенностей работы конструкций покрытия резервуаров были проведены испытания до разрушения двух плит покрытия, извлеченных из прямоугольного резервуара для хранения сырой нефти.

Полевые испытания двух ребристых плит покрытия размерами в плане 1 × 5 м проводились в комплексе обследовательских работ при положительной температуре путем силового воздействия для определения фактической несущей способности плит, их жесткости и трещиностойкости.

Загружение ребристых плит покрытия ступенчато-возрастающей нагрузкой осуществлено штучными грузами, в качестве которых служили тарированные бетонные (фундаментные) блоки. Загрузку плит блоками производили симметрично относительно середины пролета конструкции (рисунок 1).

Таблица 1. Основные конструктивные отличия резервуаров, расположенных в нефтепарках

Тип резервуара	Тип I	Тип II	Тип III
Конфигурация	Прямоугольный	Цилиндрический	
Внутренние опоры	Сетка колонн с шагом 5 × 5 м	6 колонн в центре резервуара	30 концентрически расположенных колонн + 1 колонна в центре
Вертикальный разрез
План стен и колонн	5 × 11 = 55 м	D = 42 м	D = 42 м
План плит покрытия	440 плит, L = 5 м	48 плит, L = 18 м	108 плит, L = 5.80; 6,95; 7,00 м

Таблица 2. Результаты физико-химических и физико-механических испытаний

Наименование объекта	Место отбора проб	Влажность бетона по массе, % $\bar{W}_M$, ср	Водопоглощение бетона по массе, % $\bar{W}_M$, ср	Глубина карбонизации защитного слоя бетона, мм
Прямоугольный резервуар	Ребро плиты у опоры	0.66	4.83	3
	Ребро плиты в середине пролета	0.48	4.25	
	Ригель	0.48	3.07	-
Цилиндрический резервуар 1 группы	Ребро плиты у опоры	0.24	4.06	6
	Балка	0.59	3.99	7
	Колонна	0.38	2.47	5
Цилиндрический резервуар 2 группы	Плита, поперечное ребро	1.49	3.67	1.5-10.0
	Балка	1.48	3.79	1.0-2.3
	Опорная подушка (надколонная)	1.71	4.11	-
	Колонна	0.9	1.03	0.5-2.0

Рисунок 1. Схема нагружения плиты

Прочность и трещиностойкость плит покрытий оценивались по весу штучных грузов, а также по моменту появления трещин и ширине их раскрытия, а жесткость конструкций - по величине прогиба продольных ребер.

На плиту покрытия была приложена нагрузка из 7 ступеней (долей), каждая из которых превышала 10 % контрольной нагрузки - при проверке прочности и трещиностойкости, и 20 % - при проверке жесткости (рисунок 2). После приложения каждой доли нагрузки конструкцию выдерживали под этой нагрузкой 5 мин. После приложения последней 7 ступени - плиту выдержали под этой нагрузкой 20 мин.

Для измерения величины прогиба на каждой ступени нагружения использовалась стальная проволока, которая протягивалась параллельно плите по нижней грани продольного ребра и заземлялась на опорах в точках опирания плит покрытий. В середине пролета на боковой грани продольного ребра

была прикреплена шкала с ценой деления 1 мм, начало отчета которой совпадало с линией натяжения проволоки.

В процессе испытания фиксировались появившиеся трещины, измерялся прогиб в середине пролета (зона максимального изгибающего момента) и ширина раскрытия трещин.

После окончания испытаний для каждого арматурного стержня была определена фактическая толщина защитного слоя на разрушенной конструкции.

Испытание двух ребристых плит показало практически полную идентичность их поведения при нагружении с достижением глубокого течения растянутой арматуры, развития нормальных продольной оси трещин в ребрах плиты в средней части пролета высотой до 0.6-0.8 высоты сечения и достижения прогибов более 1/70 пролета. Этот уровень нагрузки весьма близок к разрушающей (рисунок 3).

а) 1 ступень; б) 2 ступень; в) 3 ступень; г) 4 ступень; д) 5 ступень; е) 6 ступень; ж) 7 ступень

Рисунок 2. Ступени приложения нагрузки

M_p - изгибающий момент от расчетной нагрузки;
 M_n - изгибающий момент от нормативной нагрузки;
 $f_{ост.}$ - остаточный прогиб после снятия нагрузки

Рисунок 3. Нарастание прогиба при испытании плит в полевых условиях

Данные определения прочности бетона по двум плитам покрытия резервуара склерометром «ИПС-МГ4» показали значительное (в 1.5-2.0 раза) превышение прочности бетона по сравнению с проектной.

В процессе испытания двух плит на стадии нагружения, соответствующей полной нормативной нагрузке, зафиксирован прогиб $f_p \approx 1$ см, что существенно меньше расчетного значения прогиба, равного $f_p = 1.44$ см.

Таким образом, в результате испытания до стадии развития пластических деформаций в арматуре было установлено, что плиты имеют запас по сравнению с проектной расчетной нагрузкой, определенной по СП 63.13330.2018 «Бетонные и железобетонные конструкции» [7]. Данные натурных испытаний двух плит покрытия показали их абсолютную полноценность по несущей способности, жесткости, трещиностойкости и эксплуатационной пригодности относительно исходных расчетных показателей по проекту (таблица 3) после длительной эксплуатации в условиях контакта с низко- и среднесернистой нефтью.

Таблица 3. Значения коэффициента запаса по результатам испытаний

Параметр	Коэффициент запаса по условиям:		
	прочности	жесткости	трещиностойкости
Среднее значение коэффициента запаса по результатам испытаний двух плит	1.94	1.44	1.01

Выводы

Полученные в результате обследования данные позволили на основе разработанной методики оценить остаточный ресурс железобетонных конструкций резервуаров, а также предложить способы ремонта поврежденных конструкций с целью повышения долговечности резервуаров на срок не менее 15 лет.

Восстановление эксплуатационной надежности конструкций резервуаров должно включать следующие работы: восстановление сечения поврежденных железобетонных конструкций, нанесение защитного покрытия, реконструкцию кровли. Для восстановления сечения конструкций целесообразно применять специальные безусадочные ремонтные составы категории R3 или R4 - в зависимости от фактической прочности бетона восстанавливаемых конструкций. В качестве защитного покрытия рекомендуется применить слой торкретбетона.

При реконструкции кровли предусматривается устройство инверсионной кровли взамен существующей, что позволит не только в 4 раза снизить нагрузку на покрытие (за счет удаления слоя насыпного грунта толщиной до 300 мм), но и будет способствовать повышению долговечности конструкций покрытия за счет исключения их промерзания в зимний период.

Технико-экономическая эффективность проведения работ по продлению срока службы эксплуатирующихся резервуаров возрастает в связи с переходом многих регионов страны на добычу высокосернистой нефти, вызывающей ускоренный коррозионный износ металлических резервуаров.

Литературные и наши данные свидетельствуют о возможности длительной эксплуатации железобетона в этих условиях.

Список литературы

1. Blaszczynski T. Assessment of RC Structures Influenced by Crude Oil Products // Archives of Civil and Mechanical Engineering. 2011. Vol. 11. Issue 1. P. 5-17. DOI: 10.1016/S1644-9665(12)60170-8.

References

1. Blaszczynski T. Assessment of RC Structures Influenced by Crude Oil Products. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 2011, Vol. 11, Issue 1, pp. 5-17. DOI: 10.1016/S1644-9665(12)60170-8.

2. Кузовников Е.В., Шарков А.Е., Соколов С.С., Тарасенко А.А., Чепур П.В. Опыт реконструкции подземного железобетонного резервуара ЖБР-30000 // *Фундаментальные исследования*. 2014. № 12-6. С. 1172-1176.

3. Гумеров А.Г., Султанов М.Х. Гималетдинов Г.М., Саттарова Д.М. К ремонту железобетонных и стальных вертикальных резервуаров для хранения нефти объемом 1000-50000 куб. метров // *Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов*. 2004. Вып. 63. С. 135-148.

4. Габараев К.О. Резервуары для хранения нефти и нефтепродуктов // *Проблемы технологической безопасности: сб. ст. международ. науч.-практ. студенческой конф.* Воронеж: РГУПС, 2019. С. 133-139.

5. Нормативные документы по техническому обследованию резервуаров для хранения взрывопожароопасных и агрессивных продуктов: Сборник документов. Серия 03. Выпуск 4 / 2-е изд., испр. М.: НТЦ «Промышленная безопасность», 2009. 236 с.

6. ГОСТ 8829-2018. Изделия строительные железобетонные и бетонные заводского изготовления. Методы испытаний нагружением. Правила оценки прочности, жесткости и трещиностойкости. М.: Стандартинформ, 2019. 21 с.

7. СП 63.13330.2018. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения // *Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов*. URL: <https://docs.cntd.ru/document/554403082> (дата обращения: 01.06.2021).

2. Kuzovnikov E.V., Sharkov A.E., Sokolov S.S., Tarasenko A.A., Chepur P.V. Opyt rekonstruktsii podzemnogo zhelezobetonnoho rezervuara ZhBR-30000 [Reconstruction Experience of the Underground Concrete Tank Capacity of 30000 SQ. M]. *Fundamental'nye issledovaniya - Fundamental Research*, 2014, No. 12-6, pp. 1172-1176. [in Russian].

3. Gumerov A.G., Sultanov M.Kh. Gimaletdinov G.M., Sattarova D.M. K remontu zhelezobetonnykh i stal'nykh vertikal'nykh rezervuarov dlya khraneniya nefi ob'emom 1000-50000 kub. metrov [For the Repair of Reinforced Concrete and Steel Vertical Tanks for Oil Storage with a Volume of 1000-50,000 Cubic Meters]. *Problemy sbora, podgotovki i transporta nefi i nefteproduktov - Problems of Gathering, Treatment and Transportation of Oil and Oil Products*, 2004, Issue 63, pp. 135-148. [in Russian].

4. Gabaraev K.O. Rezervuary dlya khraneniya nefi i nefteproduktov [Storage Tanks for Oil and Oil Products]. *Sbornik statei mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi studencheskoi konferentsii «Problemy tekhnosfernoi bezopasnosti»* [Collection of Articles of the International Scientific and Practical Student Conference «Problems of Technosphere Safety»]. Voronezh, RGUPS Publ., 2019, pp. 133-139. [in Russian].

5. *Normativnye dokumenty po tekhnicheskomu obsledovaniyu rezervuarov dlya khraneniya vzryvopozharoопасnykh i agressivnykh produktov: Sbornik dokumentov. Seriya 03. Vypusk 4* [Normative Documents on the Technical Inspection of Tanks for Storing Explosive and Aggressive Products: Collection of Documents. Series 03. Issue 4]. 2nd Edition, Revised. Moscow, NTTs «Promyshlennaya bezopasnost'» Publ., 2009. 236 p. [in Russian].

6. *GOST 8829-2018. Izdeliya stroitel'nye zhelezobetonnye i betonnye zavodskogo izgotovleniya. Metody ispytaniy nagruzheniem. Pravila otsenki prochnosti, zhestkosti i treshchinostoikosti* [State Standard 8829-2018. Prefabricated Construction Concrete and Reinforced Concrete Products. Load Testing Methods. Rules for Assessment of Strength, Rigidity and Crack Resistance]. Moscow, Standartinform Publ., 2019. 21 p. [in Russian].

7. *SP 63.13330.2018. Betonnye i zhelezobetonnye konstruksii. Osnovnye polozheniya* [SP 63.13330.2018. Concrete and Reinforced Concrete Structures. General Provisions]. Elektronnyi fond pravovykh i normativno-tekhnicheskikh dokumentov. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/554403082> (accessed 01.06.2021). [in Russian].

Авторы

• Луцык Екатерина Валерьевна, канд. техн. наук
Уфимский государственный нефтяной
технический университет
Доцент кафедры «Строительные конструкции»
Российская Федерация, 450080, г. Уфа,
ул. Менделеева, 195
тел. (347) 252-10-88
e-mail: stexpert@mail.ru

• Латыпова Татьяна Владимировна, канд. техн.
наук
Уфимский государственный нефтяной
технический университет
Доцент кафедры «Водоснабжение
и водоотведение»
Российская Федерация, 450080, г. Уфа,
ул. Менделеева, 195
тел. (347) 252-10-88
e-mail: stexpert@mail.ru

• Латыпов Валерий Марказович, д-р техн. наук
Уфимский государственный нефтяной
технический университет
Профессор кафедры «Строительные
конструкции»
Российская Федерация, 450080, г. Уфа,
ул. Менделеева, 195
тел. (347) 252-10-88
e-mail: stexpert@mail.ru

• Федоров Павел Анатольевич, канд. техн. наук
Уфимский государственный нефтяной
технический университет
Доцент кафедры «Строительные конструкции»
Российская Федерация, 450080, г. Уфа,
ул. Менделеева, 195
тел. (347) 228-22-00
e-mail: fpa_idpo@mail.ru

The Authors

• Lucyk Ekaterina V., Candidate of Engineering
Sciences
Ufa State Petroleum Technological University
Assistant Professor of Building Construction
Department
195, Mendeleev str., Ufa, 450080,
Russian Federation
tel: (347) 252-10-88
e-mail: stexpert@mail.ru

• Latypova Tatjana V., Candidate of Engineering
Sciences
Ufa State Petroleum Technological University
Assistant Professor of Water Supply and Drainage
Department
195, Mendeleev str., Ufa, 450080,
Russian Federation
tel: (347) 252-10-88
e-mail: stexpert@mail.ru

• Latypov Valerij M., Doctor of Engineering Sciences
Ufa State Petroleum Technological University
Professor of Building Construction Department
195, Mendeleev str., Ufa, 450080,
Russian Federation
tel: (347) 252-10-88
e-mail: stexpert@mail.ru

• Fedorov Pavel A., Candidate of Engineering
Sciences
Ufa State Petroleum Technological University
Assistant Professor of Building Construction
Department
195, Mendeleev str., Ufa, 450080,
Russian Federation
tel: (347) 228-22-00
e-mail: fpa_idpo@mail.ru