

РАБОТА СТАЛЬНОГО ВЕРТИКАЛЬНОГО РЕЗЕРВУАРА ДЛЯ ХРАНЕНИЯ ВОДОУГОЛЬНОЙ СМЕСИ

Стальные вертикальные цилиндрические резервуары объемом 20000 м³ входят в состав технологического комплекса для приема, хранения и сжигания водоугольной смеси (ВУС). ВУС поступает в резервуары по трубопроводам и по мере необходимости отбирается для подачи на горелки котлов ТЭЦ. Для поддержания требуемой консистенции ВУС в каждом резервуаре установлено по четыре смесителя, вращающихся со скоростью 18 об/мин.

Общий вид резервуара представлен на рис. 1.

Резервуары такого назначения на период проведения экспериментальных работ не имели аналогов и являлись уникальными сооружениями по своим конструктивным решениям, особенностям строительства и эксплуатации, а их проектирование и изготовление не были апробированы практикой.

В связи с отсутствием опыта проектирования, строительства и эксплуатации подобных резервуаров, невозможностью отступлений от проекта при строительстве, в т.ч. в части устройства основания резервуара и монтажа металлоконструкций, а также из-за неопределенности динамических нагрузок от работы смесителей единственным способом решить проблему обеспечения эксплуатационной надежности построенного сооружения является выполнение натуральных испытаний с заполнением резервуара до проектного уровня. При этом обязательное условие проведения экспериментальных работ – измерение параметров его работы, характеризующих фактическое напряженно-деформированное состояние (НДС) конструкций.

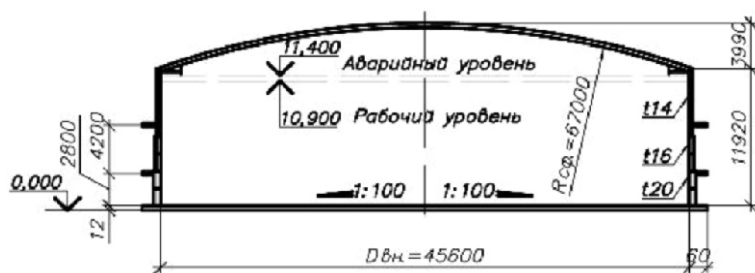


Рис. 1. Общий вид резервуара ВУС



И.И. Шульман

директор Днепропетровского комплексного отделения ООО «Украинский институт стальных конструкций им. В.Н. Шимановского», к.т.н.

Таким образом, цель проведения экспериментальных работ – оценка эксплуатационной надежности и разработка рекомендаций по эксплуатации резервуара по результатам экспериментального определения фактического напряженно-деформированного состояния конструкций и динамических характеристик, полученных при натуральных гидравлических испытаниях.

Для их проведения разработан специальный «Проект и программа испытаний». Программой предусматривается три этапа испытаний и проведения экспериментальных работ.

Первый этап, выполняемый с целью оценки технического состояния резервуара, проводится при заполнении его водой до проектной высоты $H = 10,5$ м. При этом определяются начальные геометрические параметры резервуара, общие и местные деформации стенок и днища.

По результатам испытаний, измерений и поверочных расчетов определяются расчетная циклическая долговечность резервуара, а также статические и динамические напряжения в зонах их наибольшего значения.

На *втором этапе* работ, проводимых с целью оценки эксплуатационной надежности конструкций при рабочих режимах работы резервуара, испытания проводятся при заполнении резервуара водоугольной смесью на высоту $H = 7,5$ м. При этом измеряются: статические и динамические напряжения в зонах, характеризующих напряженное состояние конструкции, радиальные перемещения стенки в узле сопряжения с днищем, частоты и амплитуды вибрации стенки резервуара.

На *третьем этапе* работ при заполнении водоугольной смесью на проектную высоту измеряются напряжения в днище резервуара (в нишах, устроенных для подвода сливных трубопроводов).

При разработке проекта испытаний резервуара учтены следующие исходные данные, принятые при его проектировании:

- нормативная снеговая нагрузка – 15 МПа;
- нормативная ветровая нагрузка – 4,5 МПа;
- расчетная температура наружного воздуха – минус 39 °С;
- плотность ВУС – 1,28 т/м³;
- максимальная высота наполнения резервуара – 11,4 м;
- срок службы резервуара – 15 лет.

Резервуар установлен на монолитном железобетонном основании с выравнивающим слоем из асфальтобетона толщиной 40...100 мм. В его основании устроены четыре ниши размером в плане 400 600 мм для врезки в днище резервуара сливных трубопроводов диаметром 100 мм.

В нижней части стенки резервуара в технологических люках установлено четыре смесителя (М1...М4) для равномерного распределения температуры ВУС по всем объемам резервуара.

Вертикальные стенки резервуара теплоизолированы минераловатными плитами толщиной 100 мм (объемный вес 500 кг/м³) и облицованы профилированными щитами.

Для окрайки днища $t = 12$ мм и верхней части стенки $t = 14$ мм применена сталь марки ВстЗсп5-1 по ТУ 14-1-3023-80 с расчетным сопротивлением 235 МПа, для нижней части стенки $t = 16$ мм и 20 мм – сталь марки 09Г2С гр.1 по ТУ 14-1-3023-80 с расчетным сопротивлением 320 МПа.

Из всего парка построенных резервуаров для испытания выбран резервуар (см. рис. 1), в рулонах и листах которого обнаружено недодвальцовку окрайков прямых участков саблевидностей, перегибы, задиры и вмятины, а в смонтированных конструкциях – хлопунцы, винтообразные выпуклости, угловатости сварных стыковых швов, депланации кромок листов в стыках.

Проектом испытаний предусматривается применение следующих методов и приборов, необходимых для определения исходных общих геометрических параметров сооружения и

напряженно-деформированного состояния конструкций под нагрузкой.

Измерения геометрических параметров сооружения. Геометрические параметры и общая деформативность выбранных зон конструкций резервуара (стенок в зоне вставки и местах перехода стенки к крышке и др.) при заполнении его водой и ВУС выполняются методами инженерной геодезии и аналитической фотограмметрии.

Для проведения исполнительных съемок на объекте создается планово-высотное обоснование, включающее геодезическую сеть центральных пунктов фотограмметрической и геодезической съемки, а также базисы для стереофотограмметрии. Геодезическое обеспечение фотограмметрических работ включает контрольные измерения и обмеры по опорным точкам и ориентирным направлениям. Для исследования изменения геометрической формы используется графметрический способ съемки образующих резервуара, выполняемый последовательно с восьми центров проектирования по восьми ориентирным направлениям.

Перемещения стенки резервуара в околошовных зонах, а также в местах перехода крыши к стенке определяются с помощью нормального и равнонаклонного случаев (видов) стереофотограмметрической съемки в пространственной фотограмметрической прямоугольной системе координат.

С помощью геодезических методов выполняются как контрольные измерения, так и измерения в рамках самостоятельной программы съемок. Фотограмметрические и геодезические измерения производятся по маркированным контрольным точкам (маркам). Количество марок, устанавливаемых на резервуаре, выбирается в зависимости от требований полноты и представительности результатов измерений.

Фотограмметрическая съемка выполняется с помощью камеры УМК 20/1318, а геодезические работы – высокоточных нивелира и теодолита. Камеральная обработка снимков производится на прецизионном стереокомпараторе способом координат. Аналитические вычисления осуществляются по специальной программе. Результаты измерений представляются в виде каталогов координат и перемещений определяемых точек, а также в графическом виде (диаграммы, графики и т. п.).

Измерение напряженно-деформированного состояния металлоконструкций резервуара.

Резервуар для хранения водоугольной смеси в соответствии с производственной технологией имеет два режима работы: статический и динамический. Статический (квазистатический) режим включает технологические операции наполнения, слива и хранения ВУС. Динамическим режимом работы резервуара является перемешивание ВУС с помощью специальных устройств.

При статическом режиме работы параметрами, характеризующими напряженно-деформированное состояние металлоконструкций резервуара, являются: напряжения в стенке резервуара и в его днище, геометрические размеры стенки при различных высотах наполнения.

При динамическом режиме работы к числу параметров, характеризующих работу резервуара, относятся динамические напряжения и виброперемещения стенки резервуара.

Каждому из режимов работы резервуаров соответствует тип проведения испытаний и, соответственно, методы и приборы для измерений напряженно-деформированного состояния и параметров работы конструкции.

При статических испытаниях деформации (напряжения) измеряются с помощью электрических тензометров сопротивления (тензорезисторов), которые обеспечивают относительно недорогой многоточечный дистанционный контроль деформаций в процессе нагружения резервуара статической нагрузкой.

При динамических испытаниях состав измерительной аппаратуры, необходимый для оценки динамических напряжений и параметров вибрации резервуара, определяется исходя из следующих предпосылок:

- Канал измерений динамических напряжений:
 - диапазон измеряемых напряжений ± 30 МПа;
 - чувствительность канала регистрации 0,2 МПа.
- Канал измерений параметров вибрации:
 - частотный диапазон измерений 1-20 Гц;
 - амплитуда виброперемещений 10–200 мкм.

Динамические испытания проводятся с помощью специально разработанного комплекта аппаратуры, обеспечивающей получение необходимой информации о динамических параметрах работы резервуара.

С целью определения мест максимальных вибраций при установившейся работе смесителей установка вибропреобразователей на конструкцию резервуара осуществлялась с помощью переносного устройства на постоянных магнитах.

Результаты испытаний и расчетно-экспериментальных исследований. Рассмотрим наиболее характерные начальные несовершенства (недопустимые отклонения от проекта) резервуара ВУС и их влияние на напряженно-деформированное состояние конструкции, а также параметры работы и эксплуатационной надежности резервуара данного типа с учетом способа устранения дефектов изготовления и монтажа (ремонтная монтажная вставка в зоне исправленных монтажных стыков), специфической особенности заполняемого продукта (удельный вес 1,28 т/м³) и технологического режима работы (работа 4-х смесителей), а также влияние динамических напряжений и вибрации стенки на циклическую долговечность сооружения.

По данным измерений геометрических параметров конструкции, до заполнения резервуара водой максимальная разность начальных диаметров от правильной геометрической формы, измеренных на отм. 4,5 м, находится в пределах 45560 – 45531 = 29 мм; максимальная разность высотных отметок наружного контура днища составляет 81 мм.

После заполнения резервуара его геометрическая форма изменяется в зависимости от высоты налива продукта (нагрузки) и принимает по сечению его горизонтальной плоскости на отметке +5,0 м и высоте налива воды 9,0 м форму неправильного эллипса, характеризуемого наличием общих и местных выпучиваний и вмятин стенок.

Изменение геометрической формы резервуара (рис. 2.) характеризуется отклонениями стенки от вертикали по восьми образующим при полной высоте налива на величины от –4 мм до +74 мм, а также наличием значительных перемещений стенки по отношению к исходному (ненагруженному) положению, превышающих по двум из восьми контролируемых образующих допустимые величины, регламентируемые СНиП III-18-75.

Деформативность стенки резервуара в зоне вставки, характеризуемая перемещениями мар-

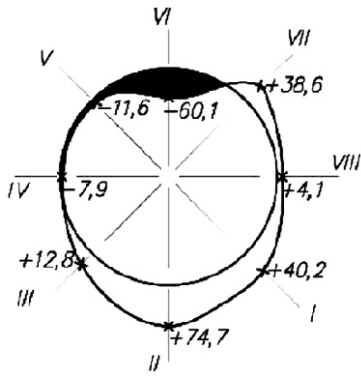


Рис. 2. Диаграмма изменения геометрии резервуара при наливe $h = 9$ м по сечению на отм. +5,0

кированных точек по радиальным направлениям, достигает величины до 95 мм при высоте налива 10,3 м. Определение диаметров резервуара по четырем направлениям (ориентирные направления I–V; II–VI; III–VII; IV–VIII) на отметке $H = +11,92$ м свидетельствует о наличии отклонений от проектного значения на величины 20...48 мм; динамические напряжения в стенке резервуара не превышают 2 МПа; размахи виброперемещений незначительны и не превышают величины 0,05 мм в диапазоне частот 5...19 Гц.

Согласно результатам выполненных расчетов минимальное количество циклов полного наполнения до появления трещины с учетом данных измерений местных деформаций составляет 3680. Максимальные динамические напряжения в стенке резервуара от работы смесителя не превышают 18 МПа. Максимальные расчетные напряжения в окрайке днища при различных коэффициентах постели основания и заполнении резервуара ВУС на высоту 11,4 м приведены в таблице 1.

На втором и третьем этапах испытаний, выполняемых при заполнении резервуара водоугольной смесью, в программу вносились изменения в части дислокации (размещения) зон контроля и измерений статических напряжений. Критерием определения зон измерений являлось такое расположение тензорезисторов, при котором по показаниям приборов можно оценить общее напряженно-деформированное состояние, а, следовательно, и прочность конструкции резервуара. Всего в описываемом эксперименте статические напряжения измерялись в 149 точках. При этом, для определения кольцевых и меридиональных составляющих напряжения в каждой точке измерялись прямоугольными розетками тензорезисторов, наклеиваемых в направлении действия этих напряжений. Более подробная характеристика мест измерений и максимальная высота заполнения резервуара при испытаниях приведены в таблице 2.

Таблица 1

Максимальные расчетные напряжения в окрайке днища

Элемент	Вид напряжения	Напряжения в МПа при коэффициенте постели, кгс/см ³				
		5	20	100	500	1000
Стенка	Меридиональные	-89,7	-124,5	-173,8	-224,8	-240,4
	Кольцевые		79,1	-37,3	-52,7	-67,4
	Приведенные		118,6	-156,2	199,8	213,6
Днище	Радиальные с внутренней стороны	174,2	236	332,7	360,9	360,6

Таблица 2

Дислокация мест измерений напряжений в конструкции резервуара

Конструктивный элемент	Днище	Стенка					
		Зона сопряжения со стенкой	Зона сопряжения с днищем	Места врезки люков	Места изменения толщин и деформаций	Места несовершенств вертикальных монтажных стыков	Места несовершенств формы
Количество мест измерений	5	7	5	3	5	2	1
Количество точек измерений	37	46	18	18	20	12	2
Высота заполнения резервуара, м	11,2	7,6	7,6	7,6	7,6	7,6	7,6

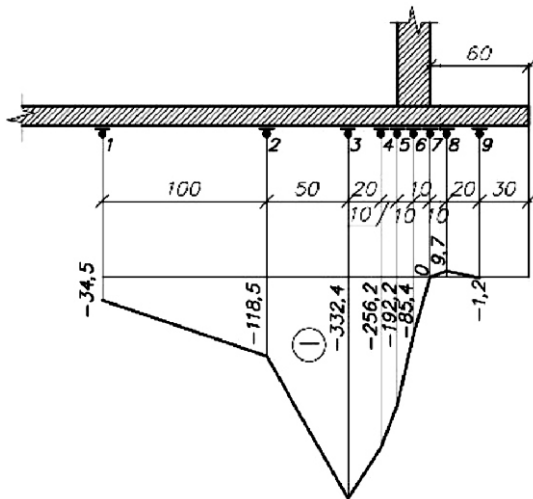


Рис. 3. Эпюры напряжений в днище резервуара при заполнении резервуара ВУС на высоту 7,5 м

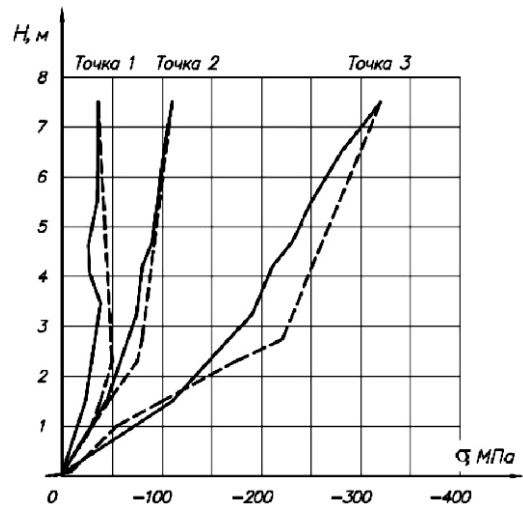


Рис. 4. График зависимости напряжений в днище резервуара от заполнения резервуара (схему установки тензорезисторов см. рис. 3)

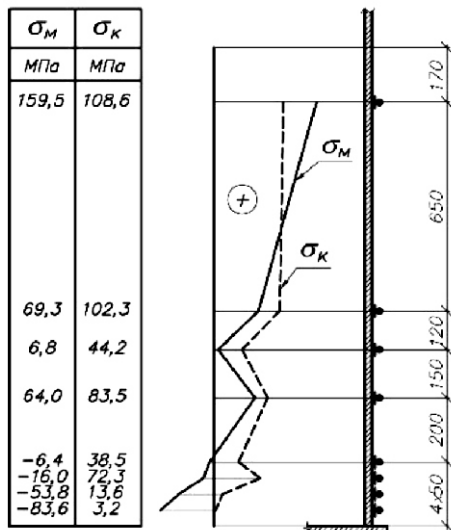


Рис. 5. Эпюры кольцевых σ_K и меридиональных σ_M напряжений в стенке резервуара (зона смесителя)

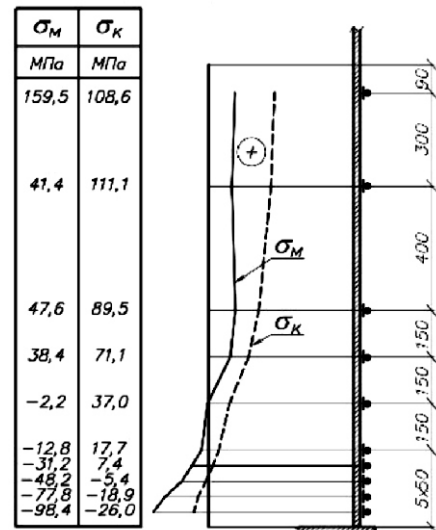


Рис. 6. Эпюры кольцевых σ_K и меридиональных σ_M напряжений в стенке резервуара (зона примыкания к днищу)

Характерные эпюры и графики изменения напряжений в зависимости от наполнения резервуара ВУС, полученные на этих этапах испытаний, свидетельствуют о следующем (рис. 3–6).

Заполнение резервуара водоугольной смесью, которая отличается от воды вязкостью, плотностью и обладает фрикционными свойствами, негативно влияет на надежность эксплуатации сооружения. При этом нормативные напряжения в стенке и днище при заполнении резервуара ВУС до аварийного уровня не превышают соответствующего расчетного сопротивления.

Высокий уровень напряжений в трех точках днища (рис. 3) при заполнении резервуара на высоту 7,5 м (второй этап испытаний) объясняется начальным погибом днища. Этой же причиной вызваны отклонения от линейной зависимости «нагрузка-напряжения» на представленных графиках. При повторном заполнении резервуара (на высоту 11,2 м, т. е. большую, чем на втором этапе) измеренные напряжения в днище не превышали соответствующего расчетного сопротивления металла.

Динамический эффект от работы смесителей не существен, коэффициент динамич-


ности равен единице; выявленный спектр колебаний не присущ сооружениям данного типа и свидетельствует о возможности появления отказов, связанных с малоцикловой усталостью.

Результаты измерений и теоретических расчетов показали, что минимальное количество полных циклов нагружения резервуара (заполнение порожнего резервуара на высоту $H = 11,4$ м) до исчерпания усталостного ресурса составляет 3680, что обеспечивает возможность его эксплуатации в течение расчетного периода (15 лет) при продолжительности одного цикла не менее 36 часов.

Исходя из результатов обследований состояния конструкций, проведенных испытаний и данных измерений напряженно-деформированного состояния металлоконструкций резервуара, для обеспечения надежной эксплуатации сооружения было рекомендовано устранить выявленные при обследовании дефекты конструкций и отступления от проекта, оказывающие влияние на эксплуатационную надежность и долговечность; заменить систему заполнения

резервуара продуктом, исключаяющим негативное воздействие заливаемого продукта на конструкции резервуара; установить постоянный автоматизированный контроль за уровнем заполнения резервуара ВУС, а также постоянные датчики по всей высоте резервуара для систематического контроля уровней напряженного состояния резервуара при его эксплуатации; организовать постоянный контроль за состоянием конструкций резервуара; при обнаружении изменений геометрических параметров (появление непроецируемых деформаций) эксплуатацию необходимо прекратить, продукт слить и сообщить об этом авторам проекта.

По результатам проведенных испытаний при условии выполнения указанных требований принято решение о возможности эксплуатации резервуара с максимальной высотой заполнения, не превышающей от м. 10,0 м.

Надійшла 27.01.2014 р. 



ПЕРВЫЙ ОБУЧАЮЩИЙ СЕМИНАР ПО РАБОТЕ С ЕВРОКОДАМИ

Проектирование стальных конструкций в соответствии с требованиями EN 1993-1-1

16-17 октября 2014, Киев

Лектор: Дэвид Браун (David Brown), Институт стального строительства Великобритании (Steel Construction Institute, U.K.)

В рамках предложенного курса слушатели ознакомятся с основами проектирования стальных конструкций и сбором нагрузок по Еврокодам, а также расчетом основных типов стальных элементов и соединений

с применением европейских норм.

Для посещения семинара **ОБЯЗАТЕЛЬНА РЕГИСТРАЦИЯ** по телефону (044) 590-01-56, или по e-mail – info@uscc.com.ua

Для членов ассоциации Украинский Центр Стального Строительства участие бесплатное. Для организаций, не входящих в состав УЦСС, стоимость будет составлять 300 гривен за 2 дня. По итогам семинара каждый участник получит копии выполненных практических заданий, а также публикации «Основы проектирования стальных конструкций зданий согласно Еврокодам» и «Основы проектирования стальных конструкций зданий согласно Еврокодам. Примеры расчетов».

ПАРТНЕРЫ

**BLACHY
PRUSZYŃSKI**

SCI