

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ТЮМЕНСКИЙ ИНДУСТРИАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи



ГРУЧЕНКОВА АЛЕСЯ АНАТОЛЬЕВНА

**НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ РЕЗЕРВУАРОВ
ПРИ ЛОКАЛЬНОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ ГРУНТОВОГО ОСНОВАНИЯ**

Специальность 25.00.19 - Строительство и эксплуатация
нефтегазопроводов, баз и хранилищ

Диссертация
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор
Тарасенко Александр Алексеевич

Тюмень – 2020

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1. ОБЗОР РАБОТ, ПОСВЯЩЕННЫХ НЕРАВНОМЕРНЫМ ОСАДКАМ ВЕРТИКАЛЬНЫХ СТАЛЬНЫХ РЕЗЕРВУАРОВ, ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	11
1.1 Анализ причин аварий вертикальных стальных резервуаров.....	11
1.2 Обзор научных исследований, посвященных изучению изменения напряженно-деформированного состояния резервуаров при неравномерных осадках оснований.....	18
1.3 Основания вертикальных стальных резервуаров и требования, предъявляемые к ним.....	24
1.4 Неравномерные осадки по площади днища. Анализ требований нормативных документов к величинам допускаемых осадок оснований и критерии их оценки.....	42
1.5 Постановка задачи исследования.....	50
Выводы по главе.....	51
ГЛАВА 2. РАЗРАБОТКА ЧИСЛЕННОЙ МОДЕЛИ ВЕРТИКАЛЬНОГО СТАЛЬНОГО РЕЗЕРВУАРА РВС-20000.....	53
2.1 Определение НДС днища резервуара аналитическим методом.....	53
2.2 Определение НДС днища резервуара при локальной неоднородности основания с учетом распределения коэффициента постели.....	58
2.3 Метод конечных элементов.....	61
2.4 Создание геометрической модели РВС-20000 в ПК ANSYS.....	63
2.5 Генерирование сетки конечных элементов, выбор типа КЭ и контактов.....	67
2.6 Задание материалов и их свойств.....	71
2.7 Задание нагрузок и граничных условий.....	72
2.8 Решение верификационной задачи для конечно-элементной модели резервуара.....	74

Выводы по главе.....	76
ГЛАВА 3. ИССЛЕДОВАНИЕ НДС РЕЗЕРВУАРА ПРИ ЛОКАЛЬНОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ ГРУНТОВОГО ОСНОВАНИЯ.....	77
3.1 Моделирование неравномерной осадки, вызванной областью неоднородности в грунтовом основании РВС	77
3.2 Рациональное планирование численного эксперимента	81
3.3 Результаты численного эксперимента, обработка результатов	84
Выводы по главе.....	102
ГЛАВА 4. МЕТОДИКА ОЦЕНКИ НДС РЕЗЕРВУАРА РВС-20000 ПРИ ЛОКАЛЬНОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ ГРУНТОВОГО ОСНОВАНИЯ.....	103
4.1 Алгоритм оценки НДС резервуара РВС-20000 при локальной неоднородности грунтового основания	106
4.2 Предложения по внесению изменений в НТД в части назначения предельных величин локальных осадок	112
Выводы по главе.....	115
ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ	117
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ.....	118
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	119
Приложение А (справочное) Свидетельство о верификации программного комплекса ANSYS	133
Приложение Б (справочное) Акт внедрения результатов исследования	134

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы. Вертикальные стальные цилиндрические резервуары (РВС) являются сооружениями повышенного уровня ответственности и относятся к I-II классу опасности. Аварии на таких объектах несут угрозу жизни и здоровью людей, а также приводят к тяжелым экологическим и материальным последствиям.

В последние годы сохраняется тенденция к увеличению единичного номинального объема хранимой нефти, а строительство резервуаров вынужденно осуществляется на территориях со сложными инженерно-геологическими условиями и нередко с наличием переувлажненных, многолетнемерзлых и пучинистых грунтов. Диаметр современных резервуаров может достигать 95 м, при этом выполнение инженерно-геологических изысканий в объеме, предписанном нормативно-технической документацией (НТД), не позволяет обеспечить высокую достоверность геологического разреза. Поскольку идеальной однородности основания при выборе площадки для строительства резервуаров в большинстве случаев обеспечить не удастся, нередко зоны с локальной неоднородностью остаются необнаруженными ещё на этапе изысканий и проектирования. Другой распространенной причиной появления зон локальной неоднородности считается изменение гидрогеологических условий естественного основания, а также развитие процессов пучения грунтов и проявление мерзлотных явлений. Днище резервуара представляет собой тонкую стальную пластинку на упругом основании толщиной 6 или 9 мм, воспринимающую нагрузку от столба нефти высотой от 12 до 18 м, поэтому образование локальных просадочных зон зачастую приводит к разрыву металлоконструкций и возникновению аварийных ситуаций.

Эксплуатационная надежность РВС при локальной неоднородности грунтового основания оценивается изменением напряженно-деформированного состояния (НДС). В отечественной НТД требования к предельной величине осадки днища не учитывают положение локальной неоднородности относительно стенки резервуара. Требования зарубежных стандартов существенно отличаются и включают рекомендацию производить дополнительный анализ НДС

металлоконструкций в зависимости от размеров зоны неоднородности и её расположения на отрезке между центром резервуара и его стенкой. Различия в конструкции сооружений и прочностных свойствах применяемых сталей препятствуют использованию требований зарубежных стандартов для оценки предельных величин осадки днищ резервуаров отечественных типоразмеров. Согласно приказу Министерства энергетики РФ и Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 19 июля 2017 г. «Об утверждении Перспективной программы стандартизации в нефтегазовом комплексе на период 2017-2022 гг.», с целью интеграции российского нефтегазового комплекса в мировую экономику поставлена задача перевода и принятия в рамках Российской Федерации международных стандартов.

Увеличивающийся поток отказов из-за возникновений локальных просадочных зон под резервуарами и необходимость гармонизации отечественной нормативно-технической документации с международными стандартами в части определения и назначения предельных величин осадки в зависимости от размера и расположения просадочной зоны на основе современных численных методов обуславливают актуальность поставленной задачи.

Степень разработанности темы исследования. Исследованию напряженно-деформированного состояния вертикальных стальных резервуаров при развитии различных видов осадок, таких, как равномерная, крен, наружный контур днища, посвящены труды отечественных и зарубежных ученых: М. К. Сафаряна, В. А. Буренина, В. Е. Шутова, П. А. Коновалова, В. Б. Галеева, А. Г. Гумерова, А. А. Тарасенко, Г. Г. Хоперского, И. В. Слепнева, А. П. Сальникова, Р. А. Мангушева, В. Кршупки, К. Кавано, С. Ямамото и др.

Исследованием НДС стальных резервуаров с учетом изменяющихся свойств грунтовых оснований занимались В. Б. Галеев, А. С. Горелов, О. П. Коновалова, В. Д. Лебедев, П. А. Дегтярёв, А. Ю. Потапов и др. В работах И. В. Слепнева, Ю. В. Соболева, А. А. Тарасенко, Е. Е. Семина обосновано применение современных численных методов для анализа НДС резервуаров при неравномерных

осадках. Отмечается, что металлоконструкции резервуара работают как единое целое и для повышения точности вычислений необходимо учитывать верхнее опорное кольцо и конструкцию крыши.

Недостаточно изученным остается вопрос о пределах деформирования полотнищ днищ крупногабаритных резервуаров при появлении локальных просадочных зон с различными деформационными характеристиками и геометрическими размерами. Наибольший интерес представляет определение величины допустимых осадок при близком расположении локальной неоднородности к стенке (краевой эффект).

Цель работы заключается в обеспечении безаварийной эксплуатации резервуаров в условиях неравномерной осадки на основании использования разработанной методики оценки напряженно-деформированного состояния резервуара РВС-20000 при локальной неоднородности грунтового основания.

Основные задачи исследования:

1. Разработать численную модель взаимодействия резервуара и основания с наличием просадочной зоны на основании модели грунтового основания Пастернака.

2. Разработать и верифицировать численную модель резервуара РВС-20000, учитывающую все конструктивные элементы сооружения и максимальные эксплуатационные нагрузки.

3. Установить предельные значения величин локальных осадок днища РВС для различных радиусов области неоднородности основания при максимальных эксплуатационных нагрузках без учета краевого эффекта. Получить зависимости максимальных действующих напряжений в металлоконструкциях РВС от деформаций, геометрических размеров и расположений области неоднородности относительно стенки РВС.

4. Разработать методику оценки напряженно-деформированного состояния резервуара при наличии локальных зон неоднородности в грунтовом основании и сформулировать предложения по внесению изменений в нормативную

документацию в части определения предельных величин осадок при наличии локальной неоднородности в грунтовом основании РВС.

Объектом исследования является вертикальный стальной резервуар РВС-20000 на грунтовом основании с наличием просадочной зоны.

Предметом исследования является совместное деформирование металлоконструкций резервуара и грунтового основания с локальной неоднородностью при воздействии максимальных эксплуатационных нагрузок.

Методология и методы исследования. При выполнении диссертационной работы применялся комплексный подход, включающий научный анализ, планирование и проведение экспериментальных исследований. Поставленные в диссертационном исследовании задачи решены с использованием методов математического анализа, численного моделирования, основных положений строительной механики, механики деформируемого твердого тела, теории упругости и метода конечных элементов.

Научная новизна результатов работы:

1. Установлены зависимости величины осадки от деформационных свойств и размеров локальной неоднородности основания, определены предельные величины осадки для днищ толщиной 6 и 9 мм.

2. Установлены зависимости между максимальными действующими напряжениями в металлоконструкциях РВС и величиной осадки для случая расположения области неоднородности в окрестностях стенки резервуара.

3. Выявлена зависимость между геометрическими параметрами области неоднородности и напряжениями в стенке, позволяющая определить границы зоны действия краевого эффекта от стенки резервуара.

4. Разработана методика оценки напряженно-деформированного состояния резервуара РВС-20000 при локальной неоднородности грунтового основания.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. При оценке предельной величины осадки локальной просадочной зоны отечественных типоразмеров резервуаров должны использоваться величины

осадок, установленные на основе зависимости между напряжениями, возникающими в днище резервуара, и величиной осадки, полученные по результатам численного анализа на детализированной конечно-элементной модели РВС-20000.

2. С целью гармонизации отечественной и зарубежной НТД, при назначении величины допустимой осадки днища для случая расположения зоны неоднородности основания в окрестностях стенки резервуара необходимо использовать установленную зависимость максимальных действующих напряжений в стенке резервуара от геометрических параметров области неоднородности основания при максимальных эксплуатационных нагрузках, с учетом краевого эффекта.

3. Для широкого практического использования результатов исследования целесообразно применять разработанные автором и внедренные в АО «Транснефть-Сибирь» алгоритм и методику оценки напряженно-деформированного состояния резервуара РВС-20000 при локальной неоднородности грунтового основания, позволяющие существенно сократить производственные расходы при назначении сроков ремонта резервуара.

4. Результаты численного анализа процесса деформирования металлоконструкций резервуаров отечественных типоразмеров при наличии просадочных зон и значения предельных величин прогибов днища должны быть учтены при внесении изменений в отечественную НТД, с целью гармонизации с зарубежными стандартами.

Теоретическая и практическая значимость работы:

1. Разработанная численная модель позволяет рассчитать в нелинейной постановке пределы деформирования резервуара от воздействия эксплуатационных нагрузок при локальной неоднородности основания. Отличие результатов расчета аналитическим и численным методами при решении верификационной задачи составило не более 3%.

2. Полученные зависимости позволяют с высокой достоверностью оценить

техническое состояние резервуара РВС-20000 при неравномерной осадке, вызванной локальной неоднородностью грунтового основания. Сформулированы предложения по внесению изменений в действующую нормативно-техническую документацию.

3. Применение разработанной и внедренной в АО «Транснефть–Сибирь» (акт внедрения №ТСИБ-01-160/232-1 от 31.05.2019) методики оценки НДС резервуара РВС-20000 при локальной неоднородности грунтового основания позволяет принимать решение о необходимости проведения ремонтных работ и существенно снижать их стоимость.

Личный вклад автора состоит в создании конечно-элементной модели и планировании численного эксперимента; выполнении расчетов и получении зависимостей; разработке алгоритма и методики оценки НДС резервуара РВС-20000 при неравномерной осадке основания; внедрении результатов исследования; формулировке положений научной новизны и теоретической и практической значимости.

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность научных положений и выводов диссертационной работы подтверждается удовлетворительной корреляцией результатов, полученных с помощью численной модели на основе метода конечных элементов, с широко известными аналитическими решениями, а также не противоречием результатам работ других авторов, верификацией разработанной конечно-элементной модели в сертифицированном Госатомнадзором России ПК ANSYS. Верификация программного комплекса подтверждается Свидетельством № 02/ANSYS/2009 Российской академии архитектуры и строительных наук. Основные положения и результаты диссертационной работы были доложены на 8 международных научных конференциях: III Международная научная конференция студентов и молодых ученых «Молодежь, наука, технологии: новые идеи и перспективы», г. Томск, 2016 г.; Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов, молодых ученых и специалистов «Энергосбережение и

инновационные технологии в ТЭК», г. Тюмень, 2016 г.; XIII Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Перспективы развития фундаментальных наук», г. Томск, 2016 г.; X Международный Западно-Сибирский нефтегазовый конгресс, г. Тюмень, 2016 г.; Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Новые технологии - нефтегазовому региону», г. Тюмень, 2016 г.; IV Международная научная конференция студентов и молодых ученых «Молодежь, наука, технологии: новые идеи и перспективы», г. Томск, 2017 г.; XV Международная конференция студентов и молодых ученых «Перспективы развития фундаментальных наук», г. Томск, 2018 г.; Международная научно-техническая конференция «Транспорт и хранения углеводородного сырья – нефтегазовый терминал», г. Тюмень, 2019 г.

Публикации. Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 10 научных трудах, в том числе 4-х статьях в журналах, рекомендованных ВАК РФ.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Тема и содержание диссертационной работы соответствуют паспорту специальности 25.00.19 – Строительство и эксплуатация нефтегазопроводов, баз и хранилищ, а именно п. 1 «Напряженное состояние и взаимодействие с окружающей средой трубопроводов, резервуаров и оборудования при различных условиях эксплуатации с целью разработки научных основ и методов прочностного, гидравлического и теплового расчетов нефтегазопроводов и газонефтехранилищ» и п. 2 «Разработка и оптимизация методов проектирования, сооружения и эксплуатации сухопутных и морских нефтегазопроводов, нефтебаз и газонефтехранилищ с целью усовершенствования технологических процессов с учетом требований промышленной экологии».

Структура и объем работы. Диссертация изложена на 134 страницах машинописного текста, состоит из введения, четырех глав, выводов, списка сокращений и списка литературы, включает 12 таблиц, 73 рисунка и 2 приложения. Библиографический список включает 113 наименований, в том числе 18 иностранных.

ГЛАВА 1. ОБЗОР РАБОТ, ПОСВЯЩЕННЫХ НЕРАВНОМЕРНЫМ ОСАДКАМ ВЕРТИКАЛЬНЫХ СТАЛЬНЫХ РЕЗЕРВУАРОВ, ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1 Анализ причин аварий вертикальных стальных резервуаров

В настоящее время вертикальные цилиндрические стальные резервуары для хранения нефти являются одними из наиболее опасных производственных объектов и относятся к сооружениям повышенного уровня ответственности. В зависимости от объема хранимой нефти типоразмерный ряд отечественных резервуаров варьируется в пределах от 100 до 250000 м³, а стоимость хранимого продукта от 3 млн. до 6,2 млрд. рублей соответственно. Очевидно, что аварии резервуаров могут привести к огромным материальным потерям. При этом аварии влекут за собой такие катастрофические последствия, как: полное или частичное разрушение самого резервуара и расположенных вблизи него зданий и сооружений, нанесение существенного экологического ущерба, а также гибель и травмирование людей. Поэтому обеспечение и повышение надежности эксплуатации резервуаров является задачей первостепенной важности.

Обеспечение безаварийной эксплуатации резервуаров обуславливается своевременной и оперативной оценкой их технического состояния. Необходимо отметить, что техническое состояние резервуаров принято оценивать по результатам анализа напряженно-деформированного состояния (НДС) конструкции РВС. Анализ причин полного и частичного разрушения вертикальных стальных резервуаров позволит выделить факторы, оказывающие влияние на развитие напряженно-деформированного состояния металлоконструкций РВС.

К исследованиям, связанным с анализом причин аварий вертикальных стальных резервуаров, относятся труды И. М. Розенштейна [53], В. Б. Галеева [16, 17], Х. М. Ханухова, А. В. Алипова [83], А. А. Землянского [31], Р. А. Мангушева, П. А. Коновалова [82], Г. Г. Васильева [13], А. А. Тарасенко [72, 76], В. Л. Березина [4, 6], О. Г. Кондрашовой [36], Дж. Кларка [99], К. Гербера

[101] и др.

В работе [53] И. М. Розенштейна представлено глубоко проработанное исследование причин, вызывающих аварийные ситуации вертикальных стальных резервуаров, выполненное на основании опыта экспертиз Центрального научно-исследовательского и проектного института строительных металлоконструкций им. Н. П. Мельникова. Так, в результате основательного анализа значительного числа разрушений РВС автор работы дифференцировал причины аварий на две категории: прямые и косвенные (таблица 1.1). Это связано с тем, что, как правило, факторов, благоприятствующих разрушению сооружения, бывает несколько, а разделение причин на главную, непосредственно вызвавшую аварию, и способствовавшие ей, является условным.

Таблица 1.1 - Причины разрушения РВС согласно [53]

Причины разрушения вертикальных стальных резервуаров	
Прямые	Косвенные
Трещины: хрупкие, вязкие	Низкое качество работ и материалов
Неравномерные осадки	Нарушение технологии монтажа
Дефекты сварных соединений	Некачественное выполнение работ и контроля
Пересортица проката	Неудовлетворительная организация работ
	Неудачные проектные решения

В работе [82] на основании статистической обработки более 200 случаев разрушений РВС авторы обозначили 6 основных причин аварий резервуаров, без учета коррозии металлоконструкций, из которых наиболее значимую представляет неравномерная осадка основания. К оставшимся 5 причинам авторы относят нарушение технологии строительно-монтажных работ, наличие концентраторов напряжений в металлоконструкциях РВС, наличие низкочастотной вибрации от насосов, наличие дефектов в материале и конструкции, грубые ошибки на стадии проектирования и изысканий (рисунок. 1.1).

В работе [18] к основным причинам, вызывающим аварии резервуаров, А. С. Горелов относит:

- дефекты сварных швов;
- потеря металла в результате коррозионного износа;
- нарушение требований и правил технической эксплуатации РВС;
- неравномерные осадки и локальные просадки грунтового основания;
- низкое качество монтажа конструкции и некачественно подготовленная искусственная и естественная часть основания, что в результате приводит к деформации цилиндрической оболочки РВС;
- воздействие низких температур окружающего воздуха на физико-механические свойства материалов, применяемых при строительстве резервуаров, в том числе хрупкое разрушение сталей.



Рисунок 1.1 - Основные причины разрушения вертикальных стальных резервуаров согласно [82]

В [36] также отмечено, что развитие неравномерных осадок оснований неизбежно в процессе эксплуатации резервуаров, а недопустимо большие осадки приводят к авариям РВС. Кроме авторов работ [13, 56, 72, 76], неравномерную осадку оснований резервуаров относят к доминирующей причине разрушения РВС многие исследователи, особенно в случаях, когда основание сложено слабонесущими грунтами. На рисунке 1.2 представлены повреждения вертикальных стальных резервуаров, вызванные развитием неравномерной осадки основания.



Рисунок 1.2 - Повреждения вертикальных стальных резервуаров в результате неравномерной осадки основания

Приведем несколько примеров аварийных ситуаций известных в мировой практике эксплуатации вертикальных стальных резервуаров, вызванных неравномерной осадкой их оснований.

В конце 1974 г. резервуар Т-270 объемом 50000 м³, принадлежавший японской корпорации Mitsubishi, потерпел аварию из-за неравномерной осадки основания. Емкость была расположена на площадке, сложенной слабыми

грунтами. После 7 месяцев эксплуатации резервуара осадка днища составила 25-30 см [18]. Необходимо отметить, что нефтехранилище практически весь период эксплуатации было заполнено и испытало не более 30 циклов нагрузки-разгрузки. Развитие неравномерной осадки основания привело к образованию разрыва между корпусом и дном, раскрытие которого составило 15 см, а длина по дуге достигла значения 10 м [56].

В 1955 г. на нефтебазе вблизи г. Фоулей два резервуара были разрушены из-за больших локальных просадок оснований во время проведения гидравлических испытаний [98, 99]. Так, на расстоянии 200 см от стенки резервуара прогиб днища составил 15 см, что в дальнейшем вызвало разрушение сварных швов окрайки днища [18].

В 1970-х гг. в Европе произошли три крупные аварии резервуаров диаметром 53 м, принадлежащих компании ESSO, два из которых были заполнены водой, а последний – нефтью. Детальное исследование обстоятельств аварии одного из резервуаров позволило сделать вывод о том, что его разрушение также произошло в результате развития больших локальных просадок [18, 88]. Разность осадок двух точек днища резервуара на расстоянии двух метров от стенки составила 250 мм, уклон днища в этой зоне достиг значения 0,07 [88]. При этом разность осадок листов днищ неповрежденных резервуаров находилась в пределах 40-50 мм.

В работе [88] отмечено, что первоначальной причиной аварии, вероятнее всего, стала трещина в полотнище днища или в сварочном шве в зоне с максимальными локальными перемещениями. В результате течи воды через образовавшуюся трещину произошло насыщение грунта жидкостью, что привело к снижению его несущей способности и размыву, а впоследствии, к дальнейшему раскрытию трещин и увеличению перемещений. Местные просадки грунтового основания были вызваны несколькими причинами. Одной из них стала неудовлетворительная организация работ по исправлению формы стенки: ниши под домкраты, спровоцировали ослабление основания, а подъем некоторых участков днища привел к образованию недопустимых растягивающих напряжений

в листах его полотнища.

В 2002-2003 гг. на территории Удачинской нефтебазы ЗАО АК «АЛРОСА» (Республика Саха (Якутия)) произошли две аварии вертикальных стальных резервуаров объемом 700 м^3 , которые были введены в эксплуатацию в 1976-1982 гг. [28]. Оба резервуара были выполнены из стали марки 09Г2С. В первом случае развитие неравномерной осадки днища резервуара вызвало выпирание опорной стойки РВС, в результате чего произошел отрыв крыши резервуара от его корпуса. Во втором – локальная деформация стенки в виде складки в зоне уторного шва, вызванная неравномерной осадкой днища, привела к образованию сквозного свища. В обоих случаях аварийного разлива хранимого продукта удалось избежать, однако резервуары были выведены из эксплуатации.

Еще одна авария резервуара объемом 1000 м^3 , предназначенного для хранения светлых нефтепродуктов, произошла на территории Республики Саха летом 2004 г. Резервуар был введен в эксплуатацию в 1968 г. и изготовлен из стали марки ВСтЗпс. В результате разрушения днища произошла утечка хранимого продукта. По результатам нивелирования днища, выполненного в рамках технического обследования после аварии, было установлено отклонение от горизонтали – 242 мм. В ходе расследования аварии вблизи уторного соединения бы обнаружен свищ диаметром 15 мм, который образовался в результате разрыва листа днища в направлении – вверх. Причиной образования свища была названа недопустимо большая осадка резервуара [2]. Зимой 1988 г. в штате Пенсильвания произошло разрушение резервуара объемом 15000 м^3 , принадлежавшего компании «Ашленд Ойл Инкорпорейтед» и предназначенного для хранения дизельного топлива. Развитие больших неравномерных деформаций основания привело к аварии резервуара после заполнения. В результате разрушения содержимое резервуара вылилось наружу, было повреждено обвалование и разрушен соседний резервуар, располагавшийся на расстоянии 20 м от первого [56].

В таблице 1.2 представлены данные обследования более 30 резервуаров, имеющих неравномерную осадку по площади днища. Так, $2/3$ от общего числа

резервуаров имеют локальные осадки центральной части дна, при этом в некоторых случаях дно резервуара разорвано либо конструкция РВС вообще разрушена.

Таблица 1.2 - Данные обследования резервуаров, имеющих неравномерные осадки по площади дна

Источник	Диаметр, м	Общая осадка (прогиб) центральной части дна		Локальные просадки центральной части дна			Примечание
		f_0 , см	f , см	S, см	d, м	Положение	
Бэлл (1980)	52,3	30,0	25,0	3,0	4,0	А	
	52,3	30,0	20,0	6,0	2,5	В	разрыв дна
	96,2	72,0	7,0	2,0	13,5	В	
	46,6	0	18,0	6,0	4,0	В	
	74,5	0	19,0	3,0	14,0	В	
	46,6	0	21,0	11,0	6,0	В	
	68,6	41,0	28,0	ИН	ИН		
	45,7	0	37,0	ИН	ИН		
	61,6	71,0	42,0	7,0	10,0	В	
	61,6	71,0	44,0	ИН			
	61,6	0	46,0	ИН			
	38,4	54,0	68,0	ИН			
	36,6	15,0	9,0	1,0	6,0	В	разрыв дна
45,7	21,0	0	36,0	19,0	В		
Карлсон (1961)	45,7	21,0	25,0	68,0	19,0	А/В	разрушение резервуара
	56,6	0	43,0	8,0	2,2	В	
Кларк (1971)	14,6	15,0	46,0	ИН	ИН		
Грин и Хайт (1974)	24,4	24,0	82,0	ИН	ИН		разрыв дна
	14,6	0	45,0	ИН	ИН		
Пенман (1977)	24,4	0	81,0	ИН	ИН		разрыв дна
	39,0	0	14,0	7,0	15,0	А	
TONEN	63,9	-28,0	-16,0	2,5	6,0	В	положение дна исправлено
	63,9	-42,0	28,0	7,5	5,3	А	
	63,9	-37,0	-18,0	9,5	8,5	В	положение дна исправлено
	63,9	-40,0	40,0	14,0	27,0	В	

Продолжение таблицы 1.2

Источник	Диаметр, м	Общая осадка (прогиб) центральной части днища		Локальные просадки центральной части днища			Примечание
		f_0 , см	f , см	S, см	d, м	Положе- ние	
TONEN	63,9	-38,0	20,0	7,5	14,9	В	
	63,9	-42,0	-5,0	7,5	5,0	А	
	63,9	-38,0	37,0	7,0	4,2	А	положение днища исправлено
	63,9	-40,0	23,0	4,5	11,7	В	
	63,9	-44,0	23,0	14,0	4,8	А	

Из приведенного выше анализа аварий РВС и их причин следует, что неравномерные осадки, вызванные неоднородностью грунтовых оснований, являются одной из главных причин разрушения резервуаров. Необходимо отметить, что неизбежное появление в процессе эксплуатации РВС концентраторов напряжений в виде хлопунгов центральной части днища, коррозионных повреждений в зоне сварных швов, «искусственных подрезов», непроваров и другие дефектов сварных соединений в сочетании с деформациями, вызванными неравномерной осадкой, существенно снижают прочность конструкции.

1.2 Обзор научных исследований, посвященных изучению изменения напряженно-деформированного состояния резервуаров при неравномерных осадках оснований

В последние годы область резервуаростроения развивается в двух направлениях: увеличении единичной ёмкости хранения нефти и продлении срока службы резервуаров, исчерпавших свой полный ресурс. Вертикальные стальные резервуары в процессе эксплуатации подвергаются ряду нагрузок и воздействий: нагрузка от снеговых мешков и ветра, гидростатическая нагрузка, избыточное и вакуумметрическое давление, собственный вес металлоконструкций РВС и стационарного оборудования, температурные воздействия, воздействия от

деформаций грунтового основания и др. Воздействие данных усилий приводит к формированию сложного напряженно-деформированного состояния элементов конструкции РВС. Поэтому достижение прогресса в данных направлениях, при и без того сложных условиях эксплуатации РВС, требует проведения теоретических и экспериментальных исследований, усовершенствования математических моделей, а также разработку методик, позволяющих определить реальное НДС РВС при неосесимметричном нагружении конструкции.

Исследованием напряженно-деформированного состояния вертикальных стальных резервуаров занимались П. П. Бородавкин [10], В. Л. Березин [4-6], М. К. Сафарян [58, 59], В. А. Буренин [11, 12], В. Е. Шутов [92], Р. А. Мангушев и П. А. Коновалов [82], В. Б. Галеев [16, 17], А. А. Тарасенко [72, 76], Г. Г. Хоперский [84], А. С. Горелов [18], В. Д. Лебедев [43], И. В. Слепнев [60], А. П. Сальников [56], А. Ю. Потапов [49], П. А. Дегтярев [25], В. Кршупка [40], К. Кавано и С. Ямамото [93, 94] и др.

Вопросу напряженно-деформированного состояния узла сопряжения стенки и днища резервуара посвящены работы С. П. Тимошенко [79], М. К. Сафаряна [58, 59], В. Л. Березина и В. Е. Шутова [5], Т. Т. Стулова [64], Дж. Лангвелда [103] и др.

Авторы работы [59] для определения усилий, возникающих в уторном узле резервуара, применили метод сил. Днище и стенка рассматривались как балка на упругом основании, при этом в расчете для стенки был принят фиктивный коэффициент постели. Однако авторами были приняты следующие допущения: резервуар находится в условиях осесимметричной деформации, а кольцевыми напряжениями в днище РВС пренебрегают. Так, принятые допущения ограничивают применение полученных результатов и пригодны лишь в случае осесимметричности деформаций конструкции. Также метод сил в своих работах использовали С. П. Тимошенко [79], Л. З. Румшинский [55] и В. В. Любушкин [44].

В работе [64] Т. Т. Стулов предпринял попытку решить задачу о влиянии неравномерной осадки основания на НДС узла сопряжения стенки с днищем. Полученные автором результаты существенно отличаются от экспериментальных

значений, так как при описании расчетной схемы были введены многочисленные упрощения.

Японские ученые С. Ямамото и К. Кавано в [93, 94] представили результаты исследования напряжений и деформаций, вызванных неравномерной осадкой основания РВС, в виде графических зависимостей. Данные зависимости были получены для конкретных конструкций резервуаров, применяемых за рубежом, и не могут быть применены для оценки НДС отечественных резервуаров в виду их конструктивных отличий. При этом авторы не приводят никаких алгоритмов, которые позволили бы получить аналогичные зависимости для резервуаров отечественных типоразмеров.

В. Кршупка в [40] привел частный расчет деформаций листов верхнего пояса стенки для двух случаев: 1) подъем резервуара в нескольких точках; 2) неравномерная осадка основания, симметричная относительно некоторого значения $\beta_0 = 0$. В первом случае – при ремонте оснований – такой расчет может быть реализован, а во втором нет, так как неравномерные осадки симметричного типа в практике эксплуатации резервуаров не встречаются [17]. Также В. Кршупка, исследуя деформации верхнего сечения стенки РВС, использует полумоментную теорию оболочек В. З. Власова, не приводя обоснование правомерности её использования. Так, результаты, полученные чешским ученым, не могут быть применены для оценки прочности РВС при неравномерной осадке.

Также исследованию устойчивости верхних поясов стенки посвящены работы А. Г. Гумерова, К. Е. Ращепкина, В. Л. Березина, В. Е. Шутова [4, 6, 15, 95].

В. Б. Галеев, В. А. Буренин, А. А. Тарасенко, В. В. Любушкин в работах [11, 17, 44, 76] использовали теорию разложения неравномерной осадки в гармоники рядов Фурье. Кривая осадки задавалась тригонометрическим полиномом: производилось разложение функции в ряды Фурье по количеству точек нивелирования, далее определялись элементарные напряженно-деформированные состояния с последующим их суммированием согласно принципу суперпозиции. Известно, что применение рядов Фурье предполагает

поиск коэффициентов, которые не всегда удается определить (особенно в случае высших гармоник), кроме этого, ряды Фурье приближенно описывают реальную кривую неравномерной осадки [84]. Использование данного подхода не позволяет получить точные значения параметров, характеризующих реальное НДС конструкции.

В работе [60] И. В. Слепнев вводит безразмерный параметр $n = \pi R / L$, где R – радиус резервуара, а L – длина зоны депланации, и строит графические зависимости деформаций и напряжений от данного параметра. Затем автор предлагает оценивать влияние отдельно взятой зоны депланации с параметром n и произвольным амплитудным значением депланации простым умножением напряжений и деформации, определенных из графиков, на величину неравномерной осадки [84]. Также вводится дополнительный коэффициент, представляющий собой отношение радиальных перемещений оболочки к её вертикальным перемещениям. При произвольной совокупности зон неравномерной осадки [60] рекомендуется оценивать влияние каждой зоны путем использования графиков взаимного влияния, построенных по результатам соответствующих расчетов оболочки в общем случае деформации, а результирующее действие – как сумму полей влияния каждой зоны депланации. Трудоемкость методики, значительное количество коэффициентов, упрощений и эмпирических зависимостей, а также моделирование осадки путем «вырезки» участка грунтового основания под стенкой не позволяют получить значения НДС, отражающие реальные условия работы резервуара, а лежащий в основе расчета принцип суперпозиции сил может привести к большим погрешностям в результате расчетов.

Численному моделированию НДС цилиндрических стальных резервуаров посвящены работы В. А. Буренина [11], И. В. Слепнева [60], В. Б. Галева [17], Г. Е. Коробкова [38], А. А. Тарасенко [76], П. В. Чепура [88-90], А. П. Сальникова [56].

В работе [60] для расчета деформирования оболочки автор применил

программный комплекс «ЛИРА», реализующий метод конечных элементов (МКЭ). Задача решалась в линейной постановке, при этом разработанная модель РВС не учитывала действительную геометрию конструкции, при моделировании крыши были допущены серьезные упрощения, а перемещения верхней кромки стенки были запрещены, что привело к искажению результатов расчетов.

А. А. Тарасенко в исследовании [76] разработал численные модели резервуаров различных объемов и конструкций при помощи программного комплекса «DAST» на основе метода конечных элементов. Автор предпринял попытку оценить напряженно-деформированное состояние резервуара при воздействии сосредоточенных сил от подъемных устройств. В результате было установлено, что несовершенства геометрической формы оболочки РВС, а также пространственное положение конструкции значительно влияют на НДС крупногабаритных резервуаров. Однако полученные результаты не могут быть применены для оценки НДС резервуара при неравномерной осадке, так как используемая в расчетах модель не учитывает кривизну стенки в радиальном направлении и не предусматривает неравномерную осадку.

К современным работам, посвященным исследованию НДС резервуаров при неравномерных осадках численными методами, относятся работы [66, 70, 71, 87, 91]. При моделировании неравномерной осадки наружного контура днища РВС автор использовал подход, предложенный И. В. Слепневым в [60] - участок грунта «вырезался» под стенкой резервуара, то есть стенка свободно провисала. Моделирование осуществлялось, исходя из предположения о том, что резервуар имеет идеальное начальное положение. Численное моделирование производилось в ПК «ANSYS». Автор [88] разработал конечно-элементную модель резервуара, учитывающую геометрическую и физическую нелинейность конструкции. В результате автором были предложены аналитические зависимости между параметрами НДС резервуара и значениями неравномерной осадкой, в том числе зависимости, учитывающие элементы условного защемления, имеющие собственный фундамент. На основе полученных результатов автор разработал

алгоритм принятия решения о необходимости ремонта вертикального стального резервуара при неравномерной осадке. Однако полученные автором результаты могут быть применимы только для резервуара объемом 20000 м³.

С использованием численных методов расчета А. П. Сальников разработал методику оценки напряженно-деформированного состояния цилиндрической оболочки резервуаров при эксплуатационных нагрузках с учетом их реального положения в пространстве и действительной геометрической формы, определяемых на основании результатов трехмерного наземного лазерного сканирования [56]. Однако разработанная автором модель резервуара представляет собой только лишь трехмерную модель стенки РВС. Так данная модель не учитывает конструкцию днища, покрытия, опорного кольца и других конструктивных элементов, что снижает точность полученных результатов.

Исследованием НДС вертикальных стальных резервуаров с учетом неоднородности грунтовых оснований занимались В. Б. Галеев [18], А. С. Горелов [18], О. П. Коновалова [37], В. Д. Лебедев [43], П. А. Дягтерёв [25], А. Ю. Потапов [49] и др.

А. С. Горелов в [18] установил аналитические зависимости между коэффициентами постели и гидростатической равномерной распределенной нагрузкой с учетом их распределительной способности. Автор исследовал влияние деформационных характеристик грунтов на работу конструктивных частей резервуара для случаев: области неоднородности, не затрагивающей работу уторного узла и области неоднородности с центром около уторного соединения. Помимо этого, автор разработал математическую модель, которая позволяет прогнозировать неравномерную осадку и деформации металлоконструкций РВС. Однако при расчетах А. С. Гореловым не была учтена реальная геометрическая форма сооружения, что снизило точность результатов.

В исследовании [37] по результатам эксперимента установлена нелинейная зависимость напряжений и деформаций, возникающих в основании резервуара, представленном слабонесущими водонасыщенными глинистыми грунтами.

С учетом полученных зависимостей автор представила аналитическое решение задачи одномерной консолидации слабонесущих глинистых грунтов оснований РВС.

А. Ю. Потапов в [49] при описании работы уторного узла РВС предложил различные способы задания краевых условий, что позволило установить влияние силовых характеристик грунта на изгиб цилиндрической оболочки РВС и осадку днища. Автором разработана математическая модель, позволяющая определять деформации оболочки в радиальном направлении, осадку центральной и периферийной частей днища РВС, а также оценивать напряженное состояние металлоконструкций резервуара по данным инженерно-геологических изысканий грунтового основания. В исследовании [43] предложен метод определения коэффициента постели естественного основания на основе моделей Винклера и упругого полупространства. В. Д. Лебедевым установлены аналитические зависимости, позволяющие прогнозировать напряженно-деформированное состояние металлоконструкций РВС при проведении гидравлических испытаний и нестабилизированном состоянии естественного основания с учетом нелинейного распределения сжимающего давления.

Анализ трудов отечественных и зарубежных ученых показал, что многие вопросы влияния неравномерных осадок, вызванных локальной областью неоднородности грунтового основания, на напряженно-деформированное состояние резервуаров остаются исследованы недостаточно. Результаты описанных выше исследований не учитывают реальные условия эксплуатации вертикальных стальных резервуаров, что свидетельствует о необходимости более глубокого изучения данной проблемы.

1.3 Основания вертикальных стальных резервуаров и требования, предъявляемые к ним

Цилиндрические стальные резервуары для хранения нефти характеризуются значительными габаритными размерами, при этом пространственная жесткость их

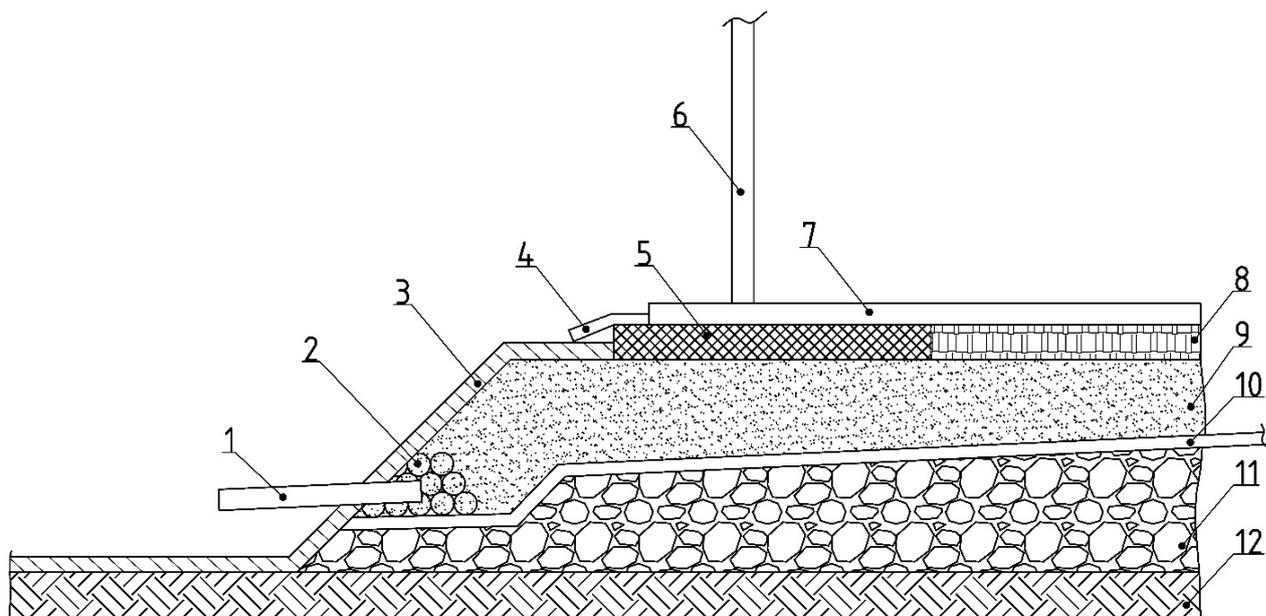
несущих конструкций сравнительно мала [18]. Это, в свою очередь, привело к установлению четких и более жестких требований к техническому состоянию оснований и фундаментов РВС. Основание резервуара состоит из естественной и искусственно подготовленной частей. К естественной части основания относится грунтовый массив, находящийся под подошвой фундамента в природном состоянии, к искусственной – фундамент резервуара и искусственно упрочненные грунты. Фундаментом наземного цилиндрического стального резервуара называют конструкцию, расположенную в грунтовом массиве, которая передает нагрузки от резервуара и распределяет их по грунтовому основанию. Распределение давления, возникающего от веса металлоконструкций РВС и эксплуатационных нагрузок, под подошвой фундамента и механические свойства грунтов, слагающих основание, главным образом определяют величину осадки резервуара. Характер распределения напряжений от передаваемых нагрузок зависит от конструкции фундамента. Отечественными актуальными нормативными документами [20, 45, 50] рекомендованы следующие конструктивные решения фундаментов под резервуары:

- грунтовая подушка;
- грунтовая подушка с железобетонным кольцом;
- железобетонная плита.

При устройстве грунтовой подушки (рисунок 1.3) грунт с низкими физико-механическими свойствами заменяют на более надёжный. При этом выполняют подсыпку из щебня, гравия или песка, поверх которой устраивают послойно уплотняемую грунтовую подушку. Модуль деформации грунта после уплотнения подушки должен составлять не менее 15 МПа, а коэффициент уплотнения не менее 0,90 [50]. Согласно [20] подушку необходимо устраивать с уклоном от центра к периферии не более 1:1,5. Ширина поверхности подушки за пределами окрайки принимается 70 см для резервуаров объемом не более 1000 м³ и 100 см для резервуаров объемом более 1000 м³ [20]. Под днищем резервуара устраивают гидроизолирующий слой минимальной толщиной 5 см, состоящий из песка и

битума без содержания коррозионно-активных веществ. Поверхность грунтовой подушки за пределами периметра резервуара защищают бетонной отмосткой [50]. Такой тип фундамента рекомендуется устраивать под резервуарами объемом менее 2000 м³ и в случае неглубокого залегания слабых грунтов (не более 3 м).

Грунтовая подушка с железобетонным кольцом является наиболее распространенным типом фундамента резервуаров в РФ.



- 1 - дренажная трубка (уклон 1:100), 2 - крупный щебень (дренажный),
 3 - бетонная или асфальтовая отмостка,
 4 - водозащитный козырек, 5 - асфальтовая стяжка, 6 - стенка резервуара,
 7 - днище, 8 - гидрофобный слой, 9 - уплотненный песок,
 10 - гибкая мембрана (уклон 1:100), 11 - уплотненный мелкий щебень, 12 - грунт

Рисунок 1.3 - Грунтовая подушка

Такой фундамент представляет собой конструкцию, состоящую из железобетонного кольца, расположенного под стенкой РВС, и грунтовой подушки внутри кольца (рисунок 1.4). Железобетонное фундаментное кольцо предназначено для распределения сконцентрированных по образующей стенки резервуара нагрузок – нагрузки от веса стенки, крыши, веса оборудования, снега и др. В [20, 50] представлены требования к размерам железобетонного кольца:

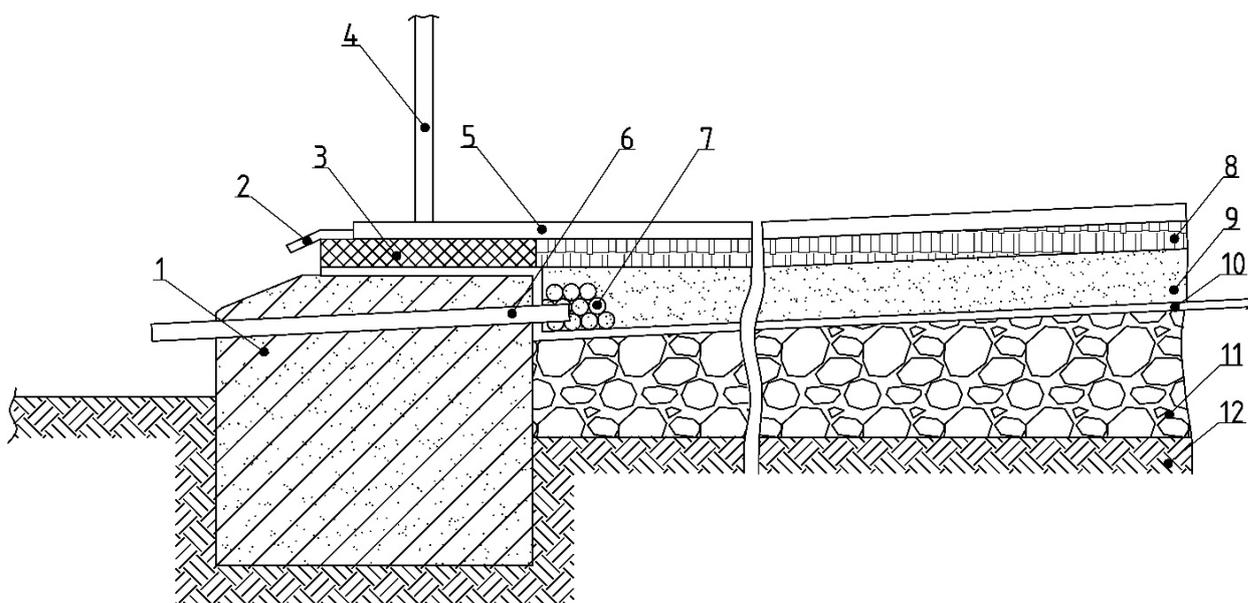
- для резервуаров объемом от 2000 до 3000 м³ ширина кольца принимается не менее 0,8 м;
- для резервуаров объемом более 3000 м³ ширина кольца принимается не

менее 1 м;

— минимальная величина толщины кольца равна 0,3 м.

Устройство кольцевого фундамента позволяет компенсировать неравномерность осадок наружного контура днища и его центральной части, которая возникает в результате различного давления, передаваемого на основание по площади и по контуру РВС, а также характеризуется простотой и экономичностью. В [7] авторы рекомендуют использовать фундамент под резервуар в виде железобетонного кольца только лишь в случае залегания в основании слабдеформируемых грунтов.

По мнению авторов [7], все грунтовые подушки характеризуются неоднородностью, независимо от способа их возведения, и могут вызвать появление недопустимо больших растягивающих напряжений в днище резервуара.



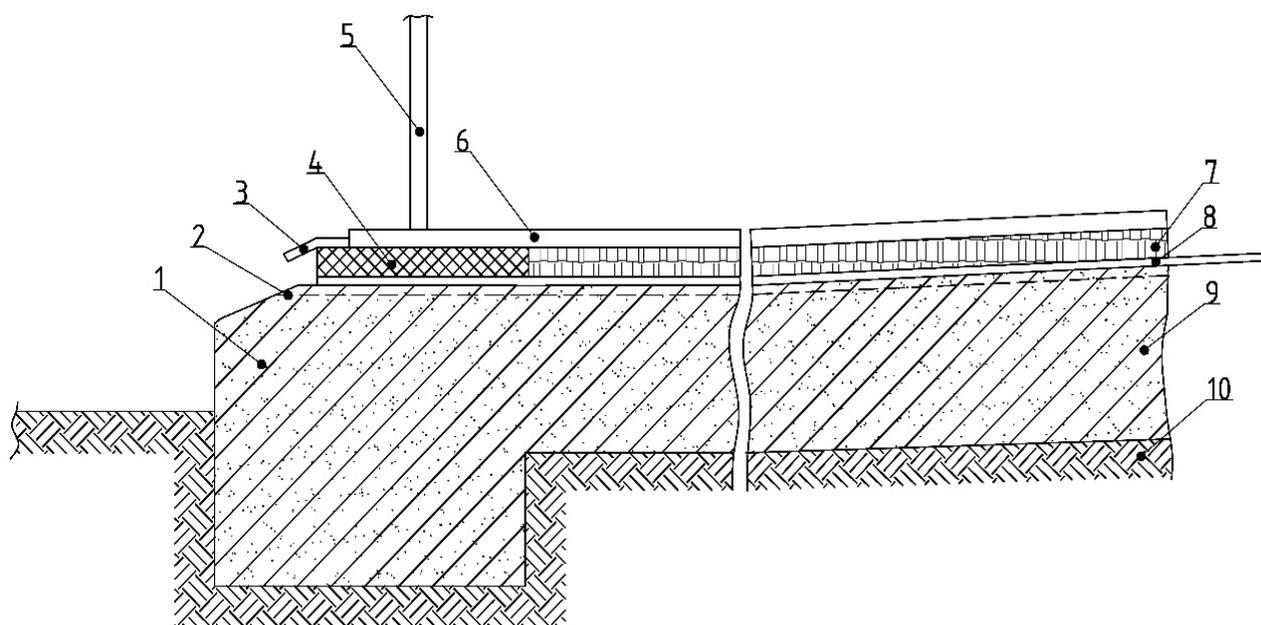
1 - кольцевой железобетонный фундамент, 2 - водозащитный козырек, 3 - асфальтовая стяжка, 4 - стенка резервуара, 5 - днище, 6 - дренажная трубка (уклон 1:100), 7 - крупный щебень (дренажный), 8 - гидрофобный слой, 9 - уплотненный песок, 10 - гибкая мембрана (уклон 1:100), 11 - уплотненный мелкий щебень, 12 - грунт

Рисунок 1.4 - Фундамент резервуара в виде железобетонного кольца

Плитный железобетонный фундамент имеет увеличенную площадь сечения по периметру резервуара (рисунок 1.5). Увеличение толщины плиты под стенкой РВС выполнено с целью снижения неравномерности осадок по контуру и

центральной части днища, как и в случае железобетонного фундаментного кольца. Помимо этого, существуют плитные железобетонные фундаменты в виде «таблетки», площадь поперечного сечения таких фундаментов одинакова в любой плоскости.

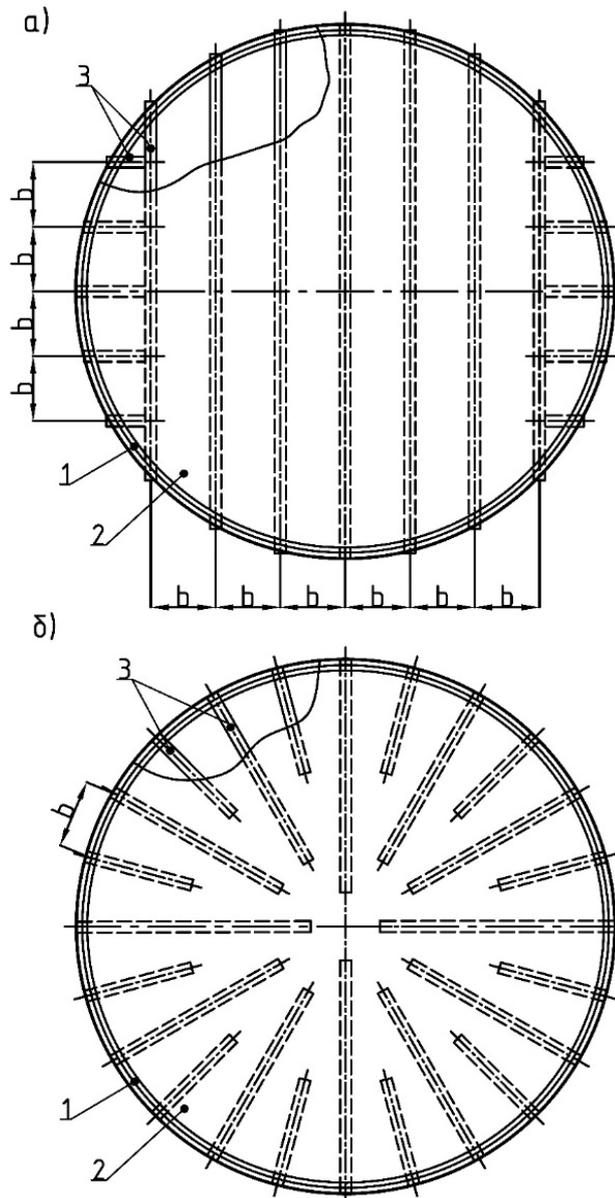
Такие фундаменты хорошо работают и мало «чувствительны» к локальным просадкам слабых грунтов в основании [7]. Однако фундаменты в виде железобетонной плиты не получили широкого распространения в отечественной практике в виду их массивности и дороговизны [69].



- 1 - железобетонная плита, увеличенная в поперечном сечении,
 2 - дренажная канавка, 3 - водозащитный козырек, 4 - асфальтовая стяжка,
 5 - стенка, 6 - днище, 7 - гидрофобный слой, 8 - гибкая мембрана,
 9 - железобетонная плита, 10 - грунт

Рисунок 1.5 - Фундамент под резервуар в виде железобетонной плиты

В российских нормативных документах представлена еще одна конструкция фундамента РВС, рекомендованная для резервуаров, толщина нижнего пояса которых не превышает 14 мм, а температура эксплуатации – не более 100 °С [20]. Такая конструкция представляет собой систему опорных балок (рисунок 1.6), выполненных из стали либо бетона, и позволяет оперативно выявлять протечки хранимого продукта через коррозионные или механические повреждения в днище резервуара [69].



1 - стенка резервуара, 2 - днище резервуара, 3 - балки каркаса

Рисунок 1.6 - Балочный фундамент: схема с параллельным расположением опорных балок (а), схема с радиальным расположением опорных балок (б)

Ширину опорных балок определяют, исходя из характеристик используемых материалов. Расстояние между осями опорных балок обеспечивает вентиляцию пространства под днищем резервуара, облегчает доступ для выполнения работ по устройству опалубки, монтажу арматуры и проведению контрольных замеров, определяется по формуле (1.1):

$$b = (t_{bc} - \Delta t_c) \cdot \sqrt{\frac{\gamma_c}{\gamma_n} \cdot \frac{2R_{bcy}}{0,001(\rho H + \rho_s t_{bc})g + 1,2P}} \quad (1.1)$$

где t_{bc} - толщина листов днища, м; Δt_c – величина припуска на коррозию, м; γ_c - коэффициент условий работы; γ_n - коэффициент надежности по ответственности; R_{bcy} - предел текучести стали, МПа; ρ - плотность продукта, т/м³; H - высота налива хранимого продукта, м; ρ_s - плотность металла, т/м³; g - ускорение свободного падения, м/с²; P - нормативное избыточное давление, МПа.

Поверхность днища резервуара, находящуюся между опорными балками, покрывают нефтяными пленкообразующими ингибированными составами с целью антикоррозионной защиты. Для защиты участков днища, опирающихся на балки фундамента, используют жертвенный алюминиевый анод (протектор). При попадании воды в скрытые полости он разрушается, что приводит к заполнению данных пустот нерастворимыми в воде продуктами коррозии (гидроокисью алюминия) и постепенному вытеснению воды [20]. Также для защиты наружной поверхности днища от коррозии рекомендуется устанавливать каплезащитное кольцо в зоне уторного соединения.

Использование балочных фундаментов актуально при эксплуатации резервуаров в условиях многолетнемерзлых грунтов (ММГ), так как наличие вентилируемого пространства сокращает тепловое воздействие от хранимого в ёмкости продукта на грунтовое основание. В случае, когда основание сложено слабыми сильно-сжимаемыми грунтами (водонасыщенные, набухающие, просадочные грунты и др.) рекомендуется устраивать свайный фундамент и проводить мероприятия по упрочнению грунтов [20, 50].

Концы свай заглубляют в мало-сжимаемые грунты, в результате чего обеспечиваются требования к предельным осадкам резервуаров. Свайное основание может быть, как по контуру резервуара – «кольцевым», так и под всей площадью РВС - «свайное поле» [20].

Если площадка строительства резервуара сложена многолетнемерзлыми грунтами, рекомендуется устраивать проветриваемое подполье – «высокий ростверк» [50]. Применение свайных фундаментов эффективно лишь в случае,

когда слой слабого грунта подстилает мало-сжимаемый слой грунтового основания с высокими механическими показателями. Применение свайных фундаментов в плохих грунтовых условиях оправдано [82], однако их устройство является дорогим, трудо- и материалоемким процессом, требующим большое количество техники и оснастки. По этой причине российские и зарубежные специалисты предпочитают исключать проектные решения, связанные с возведением свайных фундаментов.

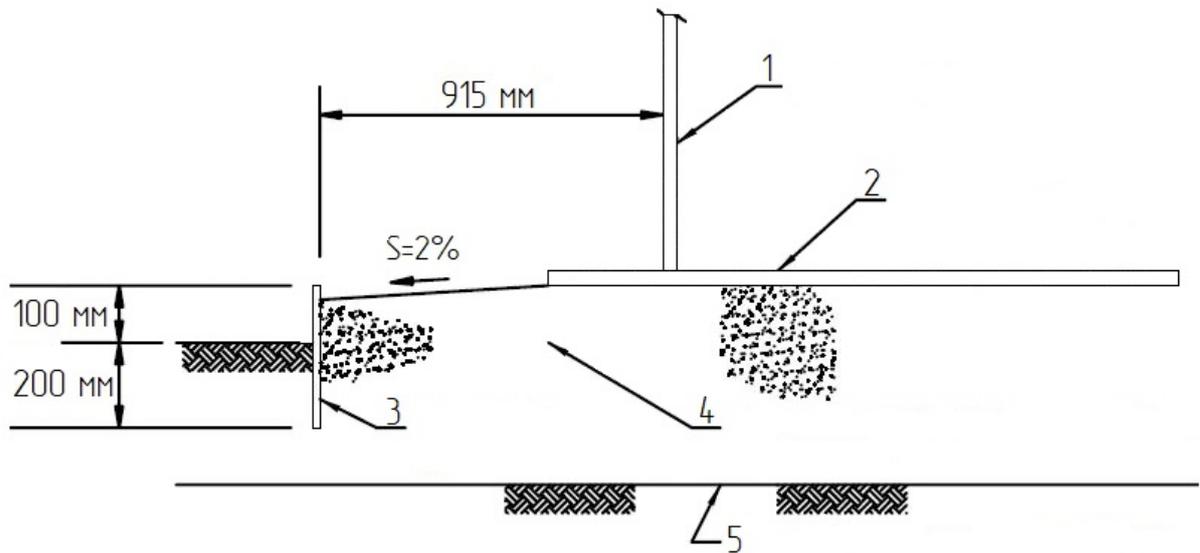
Мировой опыт строительства и эксплуатации стальных резервуаров обширен и достаточно успешен. Выбор и проектирование фундаментов под резервуары за рубежом, регламентируется такими нормативными документами, как Стандарт Американского института нефти [109], стандарты Eurocode EN [107] и British Standard [105]. В нормативных документах США рекомендованы следующие типы фундаментов под резервуары:

- уплотненная грунтовой заполнитель (грунтовая подушка);
- железобетонная кольцевая стенка;
- кольцевая стенка из щебня или гравия;
- сплошная железобетонная плита;
- свайный фундамент.

Фундамент в виде грунтовой подушки (рисунок 1.7) рекомендуется выполнять из послойно уплотненного мелкозернистого и однородного материала на естественном грунтовом основании, использование гравия или материала с крупными частицами недопустимо. Верхний слой подушки толщиной 75-100 мм следует выполнять из чистого промытого песка, это поможет обеспечить максимальную зону контакта днища с фундаментом. В конструкцию фундамента входит стальной пояс высотой 300 мм, заглубляемый в основание на глубину 200 мм, толщина пояса – 5 мм. Данный пояс позволяет ограничить уплотненный грунтовой заполнитель от естественного основания и предотвратить осыпание рыхлых грунтов поверхности, обладающих низким удельным сцеплением. Минимальная рекомендуемая высота подушки составляет 300 мм. Поверхность

грунтовой подсыпки выполняется с уклоном 1:120 от центра к периферии резервуара.

Зарубежные специалисты отмечают такие преимущества данного фундамента, как: простота изготовления, низкая стоимость, доступность используемых материалов. К недостаткам относят: узкий диапазон применения – такой фундамент рекомендован для резервуаров диаметром не более 6 м, необходимость достаточной несущей способности естественного грунтового основания, подверженность материала грунтовой подушки вымыванию в случае протечки хранимого продукта или изменения гидрологических условий.

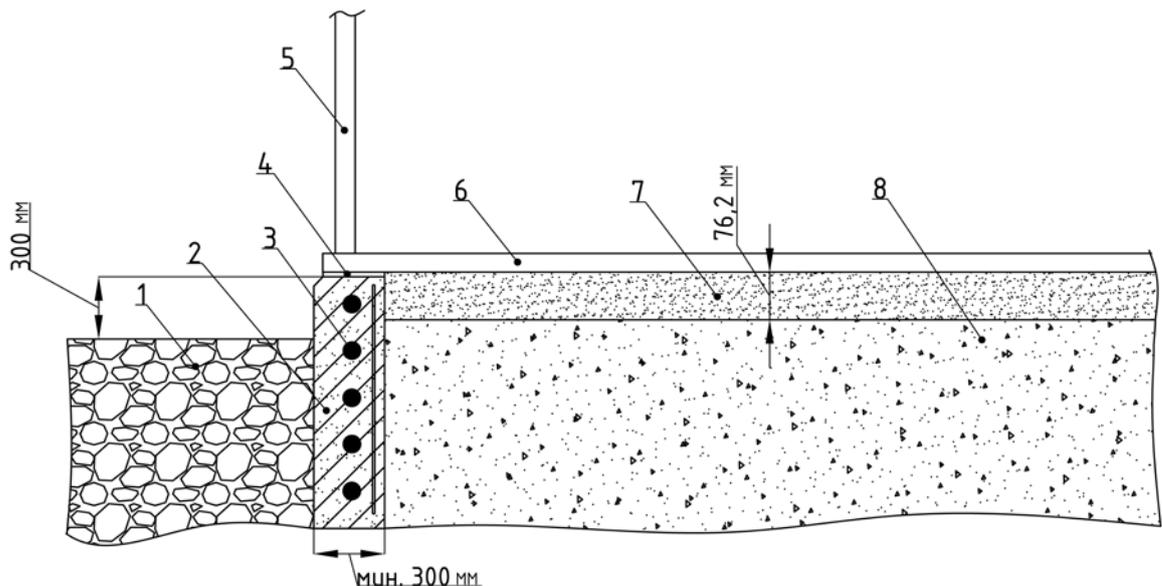


1 - стенка резервуара, 2 - днище резервуара, 3 - стальной пояс,
4 - уплотненный грунтовой заполнитель, 5 - естественное основание

Рисунок 1.7 - Фундамент в виде грунтовой подушки согласно [109]

Для резервуаров диаметром более 15 м следует использовать фундамент в виде железобетонной кольцевой стенки (рисунок 1.8) либо кольцевой стенки из щебня или гравия [109, 113]. Минимальная ширина бетонного кольца должна быть 0,3 м. Глубина заложения фундаментного кольца зависит от инженерно-геологических условий площадки, при этом основание кольцевой стенки должно находиться минимум на 15 см ниже предполагаемого уровня промерзания грунта и одновременно залегать в границах определенного несущего слоя [69, 113]. Диаметр средней линии кольцевой стенки равен номинальному диаметру резервуара, однако

в случаях необходимости размещения анкерных болтов или, исходя из предельных значений несущей способности грунта при сейсмических нагрузках или при избыточных нагрузках, направленных вертикально вверх, диаметр средней линии кольцевой стенки может быть изменен. Если ширина фундаментного кольца более 5,5 м, необходимо предусматривать устройство ленточной опоры под кольцом. Такие опоры положительно влияют на восприятие нагрузок, направленных вертикально вверх. Кольцевая стенка армируется таким образом, чтобы выдерживать изменения температуры и температурное сжатие, а также воспринимать приложенное в горизонтальном направлении давление, передаваемое через насыпной грунт, огражденный самой стенкой, при дополнительном увеличении нагрузки, создаваемой весом хранимого продукта.



- 1 - крупный гравий или щебень, 2 - кольцевая бетонная стенка,
 3 - кольцевая арматура, 4 - доска, пропитанная битумом, 5 - стенка, 6 - днище,
 7 - чистый уплотненный песок, 8 - насыпной тщательно уплотненный грунт

Рисунок 1.8 - Фундамент в виде железобетонной кольцевой стенки согласно [113]

Минимальная площадь поверхности кольцевой арматуры составляет 0,0025 от площади вертикального сечения кольцевой стенки. Кольцевая стенка должна воспринимать растягивающие усилия, которые возникают вследствие горизонтально направленного давления грунта на внутреннюю поверхность железобетонного кольца. Такое давление принимается равным не менее 50% от давления в вертикальном направлении от веса хранимого продукта и грунта. Если

используется засыпка из уплотненной измельченной каменной крошки, просеянного щебня, мелкого гравия, для определения бокового давления грунта можно использовать коэффициент, равный 30%.

Пространство внутри стенки засыпается гранулированным материалом, уплотненным до получения характеристик, указанных в технических условиях на строительство оснований резервуаров. Для засыпки выбирается материал, который легко уплотняется и имеет хорошие дренажные свойства.

Фундаменты с железобетонным опорным кольцом имеют следующие преимущества: обеспечение ровной и прочной начальной поверхности при монтаже конструкции оболочки; распределение нагрузки, создаваемой весом корпуса РВС, сконцентрированной по контуру резервуара; снижение осадки наружного контура днища; удерживание грунтового заполнителя под днищем резервуара; предотвращение потери грунтового материала вследствие эрозии; уменьшение влажности под днищем резервуара.

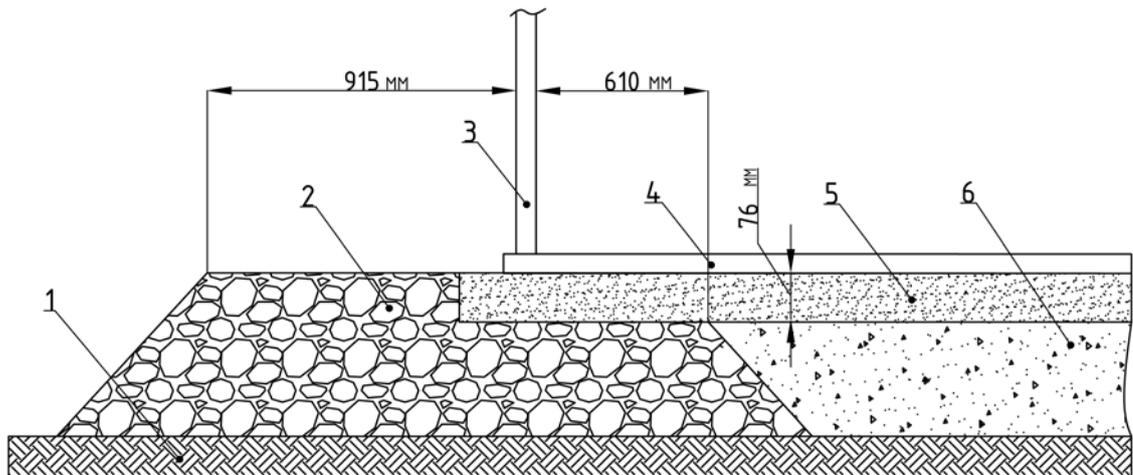
Недостатком железобетонных кольцевых стенок является невозможность их приспособления к различной осадке резервуара. Впоследствии это может привести к появлению больших изгибных напряжений в листах днища резервуара, примыкающих к его стенке.

В [109, 113] отмечено, что такой тип фундамента предпочтительно использовать также для резервуаров с плавающей крышей диаметром более 9 м, чтобы сократить неравномерную осадку резервуара, которая нередко является причиной заклинивания плавающих крыш.

Фундамент в виде кольцевой стенки из щебня или гравия (рисунок 1.9) является альтернативой кольцевой железобетонной стенке. Кольцевая стенка имеет трапециевидное поперечное сечение, размеры оснований стенки и её высота определяются, исходя из результатов инженерно-геологических изысканий. Минимальная высота кольцевой стенки согласно [113] составляет 610 мм.

Внутри кольцевой стенки устраивается грунтовая подушка из хорошо уплотняемых грунтовых наполнителей, поверх подушки устраивают слой из

чистого уплотненного песка минимальной толщиной 76 мм.



- 1 - естественное основание, 2 - кольцевая стенка, 3 - стенка резервуара,
4 - днище резервуара, 5 - уплотненный слой чистого промытого песка,
6 - уплотненный грунтовый заполнитель

Рисунок 1.9 - Фундамент в виде кольцевой стенки из щебня или гравия согласно API-650

Ширина верхнего основания кольцевой стенки за пределами стенки резервуара должна быть не менее 915 мм. Берму кольцевой стенки и её выступ за пределами оболочки резервуара необходимо защитить отмосткой.

При строительстве особое внимание необходимо уделять подготовке и поддержанию состояния гладкой горизонтальной поверхности, на которой в дальнейшем будет монтироваться днище резервуара. Так, фундамент в виде стенки из щебня или гравия обладает такими же преимуществами, что и железобетонный кольцевой фундамент. Однако в отличие от бетонной стенки, кольцевая стенка из щебня или гравия более успешно воспринимает неравномерную осадку за счет гибкости конструкции. Главной проблемой при использовании данного фундамента является обеспечение малых допусков осадки и создание плоской горизонтальной поверхности для сооружения РВС. Еще одним недостатком является повышение вероятности развития питтинговой коррозии в зонах контакта днища резервуара с кольцевой стенкой, так как между камнями может собираться вода [109].

В Соединенных штатах Америки фундамент в виде сплошной железобетонной плиты устраивается по требованию заказчика либо в том случае,

если необходимо испытываемые грунтом нагрузки распределить по поверхности, превышающей площадь резервуара [113]. Использовать железобетонную плиту в основании следует для ёмкостей диаметром не более 6 м из-за его дорогой стоимости. Сплошной железобетонный фундамент обеспечивает ровную поверхность для монтажа стенки и днища РВС, снижает неравномерность осадок резервуара, позволяет легко обнаружить протечку хранимого продукта и препятствует вымыванию грунтов основания, снижает скорость коррозии. Перемещение и осадка данного фундамента, выполненного на слабонесущих грунтах, может привести к образованию трещины. Использование сплошной плиты для резервуара в качестве фундамента является дорогостоящим решением, особенно для резервуаров большого объема.

Если проектируемые нагрузки и грунтовые условия не позволяют использовать ни один из вышеперечисленных типов фундамента, рекомендованных нормативными документами США, то альтернативным вариантом выступает свайный фундамент [113]. По результатам инженерно-геологических изысканий, в первую очередь, рассчитывают нагрузку на сваи и определяют их общее количество. Затем определяют тип и длину свай, расстояние между ними. На следующем этапе инженеры проектируют железобетонный ростверк фундамента. Свайный фундамент позволяет свести к минимуму значения общей и неравномерной осадки резервуара. Однако свайное основание резервуаров является самым дорогим и имеет более сложную конструкцию.

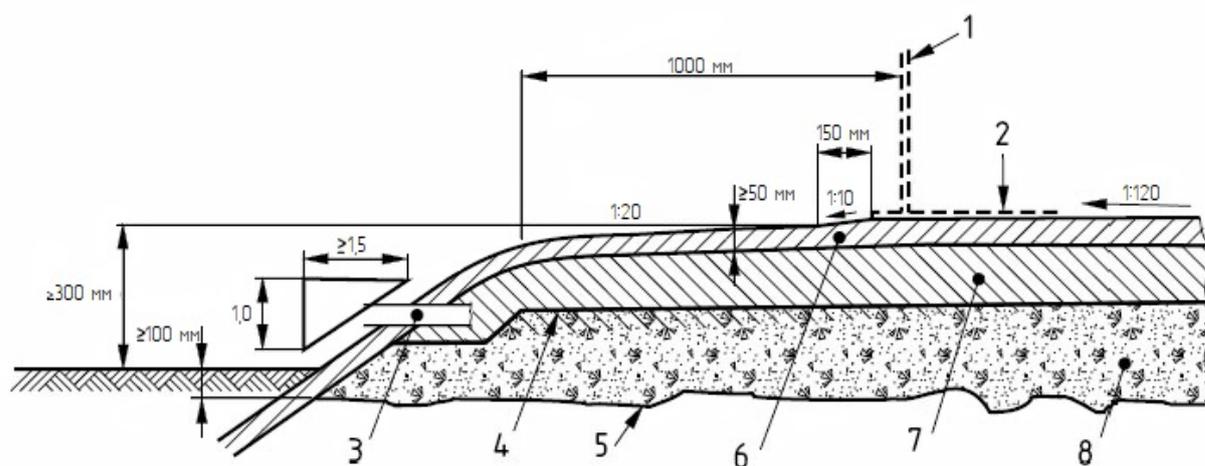
Западные стандарты Eurocode EN [107] и British Standard [105] рекомендуют четыре основных типа фундаментов для вертикальных стальных резервуаров:

- подушка;
- бетонная кольцевая балка;
- сплошная бетонная плита;
- свайный фундамент с ростверком.

Для сооружения фундамента в виде подушки (рисунок 1.10) естественное основание покрывается геотекстильным материалом, поверх которого

укладывается послойно утрамбованный щебень. На щебеночной подготовке устраивают слой из чистого уплотненного песка, под которым должна располагаться мембрана, исключающая протечку в подстилающий грунт. Верхнюю часть основания покрывают гидрофобным слоем толщиной не менее 50 мм, состоящим из битумно-песчаной смеси.

Там, где это необходимо, закладывается кольцеобразный паз из крупнозернистого материала для того, чтобы распределить нагрузку от корпуса резервуара. По периметру проницаемого слоя (утрамбованный слой чистого песка) с интервалом не более 5 м устанавливаются дренажные трубы, диаметр которых составляет 75 мм. Поверхность подушки выполняется с определенным уклоном от центра к периферии с целью обеспечить отток хранимого продукта к стенкам резервуара.

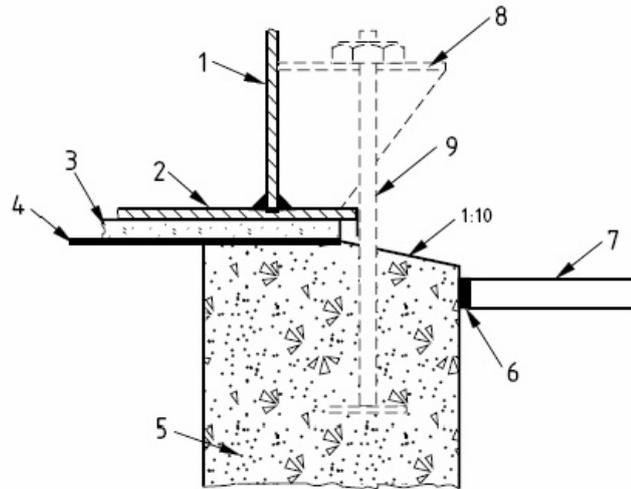


- 1 - стенка резервуара, 2 - днище резервуара, 3 - дренажная труба, 4 - мембрана,
5 - геотекстильный материал, 6 - слой из смеси битума и песка,
7 - утрамбованный песок, 8 - утрамбованный щебень

Рисунок 1.10 - Фундамент в виде подушки

Конструкция фундамента в виде бетонной кольцевой балки представлена на рисунке 1.11. Пространство внутри кольцевой балки заполняется грунтом. Кольцевая балка необходима для распределения большой нагрузки от корпуса РВС по контуру. Она должна быть спроектирована таким образом, чтобы выдерживать горизонтальное давление от уплотненного грунта и нагрузку от заполненного резервуара. Чтобы сократить неравномерность осадок наружного контура и

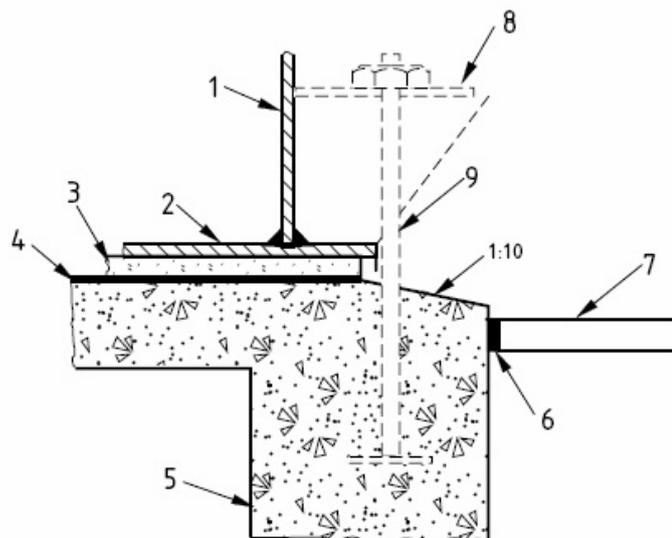
центральной части дна рекомендуется установить переходное опорное средство между внутренней частью кольцевой балки и уплотненным грунтом.



- 1 - стенка резервуара, 2 - днище резервуара, 3 - слой из смеси песка и битума, 4 - мембрана, 5 - кольцо фундамента, 6 - дополнительное уплотнение, 7 - поверхность перегородки, 8 - опора (при необходимости), 9 - анкерный болт (при необходимости)

Рисунок 1.11 - Фундамент в виде бетонной кольцевой балки

Если подстилающие слои грунтового основания обладают достаточной несущей способностью, чтобы выдержать все проектные нагрузки, рекомендуется использовать сплошной бетонный фундамент (рисунок 1.12).



- 1 - стенка резервуара, 2 - днище резервуара, 3 - слой и смеси песка и битума, 4 - мембрана, 5 - железобетонный фундамент, 6 - дополнительное уплотнение, 7 - поверхность перегородки, 8 - опора (при необходимости), 9 - анкерный болт (при необходимости)

Рисунок 1.12 - Фундамент под резервуар в виде сплошной бетонной плиты

Обычно такой фундамент имеет увеличенную толщину под стенкой резервуара, которая зависит от действующей постоянной статической нагрузки и временной нагрузки. При проектировании сплошной плиты необходимо учитывать действие локальной неравномерной осадки, усадку при высыхании и тепловую деформацию во время эксплуатации и в нештатных условиях. Для этого может понадобиться дополнительное армирование, предварительное напряжение, проектирование плиты из отдельных секций - в этом случае монтажные соединения должны иметь соответствующую изоляцию, использование специальных диагностических средств и (или) добавок к бетону.

Если в грунтовом основании резервуара залегают слабонесущие грунты, следует использовать свайный фундамент. При проектировании ростверка необходимо учитывать потенциальные изменения жесткости свай. По окончании монтажа необходимо проверить монолитность свай. Если конструкция свайной системы не позволяет проверить монолитность каждой сваи посредством эксплуатационных испытаний, то при проектировании ростверка и свайной опоры следует обеспечить перераспределение нагрузки на соседние сваи в случае выхода из строя какой-либо одной сваи.

Усадка при высыхании и температурные изменения вызывают горизонтальную деформацию, затухающую по направлению к центру ростверка. Температурные перепады и общая осадка резервуара могут привести к образованию трещин в ростверке и сваях, что существенно снизит жесткость конструкции фундамента. Особое внимание при проектировании свайного фундамента необходимо уделить соединению между оголовками свай и ростверком. Если физико-механические свойства подстилающего слоя грунта основания являются подходящими, то близко расположенные короткие сваи, имеющие малую площадь поперечного сечения, можно жестко соединить с фундаментной плитой. Там, где используются набивные сваи большого диаметра, можно использовать жесткое соединение для свай, расположенных в центре резервуара, и подвижное соединение для остальных свай. Серьезное внимание

следует уделить проблеме выпора грунта, если возможны перемещения свай.

При проектировании вертикальных стальных резервуаров расчет оснований проводится по двум группам предельных состояний: 1 группа – по несущей способности (по напряжениям), 2 группа – по деформациям [19]. Расчет оснований по деформациям является обязательным, в то время как расчет по несущей способности выполняется в случаях, установленных НТД. Осадка основания резервуара рассчитывается в соответствии с [19] при условии (1.2):

$$S \leq S_u \quad (1.2)$$

где S – расчетное значение осадки; S_u – предельно допустимая величина осадки.

В случае, если расчетное значение осадки превышает максимально допустимое, требуется проведение мероприятий по улучшению силовых характеристик грунтов основания. Уменьшение деформативности грунтов достигается следующими способами:

- уплотнение грунтов;
- устройство свайного фундамента;
- замена слабонесущих грунтов песчано-гравийной смесью;
- закрепление грунтов физико-механическими, физико-химическими и химическими методами.

К физико-механическим методам закрепления грунта относятся: уплотнение грунта укаткой, трамбовкой, электроосмотическое осушение, электросиликатизация, термическое упрочнение и другие способы. К физико-химическим: агрегация, гидрофобизация, кольматиция и глинизация грунтов. Химические методы закрепления грунтов включают способы упрочнения с введением в них вяжущих веществ – битумизация, смолизация, обработка нефтью и др.

Выбор метода искусственного закрепления грунтов производится по результатам технико-экономического обоснования. В российских нормативных документах [20, 50] представлены требования к предельным отклонениям размеров основания и фундамента до начала возведения резервуара (таблица 1.3).

Таблица 1.3 - Предельные отклонения размеров основания и фундамента

Наименование параметров	Предельное отклонение, мм, при диаметре резервуара				
	до 12 м	св.12 м до 25 м	св.25 м до 40 м	св.40 м до 65 м	св.65 м до 95 м
Отметка центра основания при: - плоском - с подъемом к центру - с уклоном к центру	0...+10 0...+10 0...-5	0...+20 0...+20 0...-10	0...+30 0...+30 0...-15	0...+40 0...+40 0...-20	0...+45 0...+45 0...-20
Отметки поверхности периметра грунтового основания, определяемые под стенкой резервуара: - разность отметок смежных точек через каждые 6 м	6	8	-	-	-
- разность отметок любых других точек	12	16	-	-	-
Отметки поверхности кольцевого фундамента, определяемые в зоне расположения стенки: - разность отметок смежных точек через каждые 6 м - разность отметок любых других точек	6 12	8 12	8 12	8 24	8 24
Ширина кольцевого фундамента через каждые 6 м	0...+50				
Наружный диаметр кольцевого фундамента, четыре измерения на ортогональных осях	±20	±20	+30 -20	+40 -30	+50 -30
Толщина гидроизолирующего слоя (на основе песка и вяжущих присадок) на поверхности кольцевого фундамента	+5				

Эксплуатационная надежность РВС зависит как от правильности проектных решений по выбору фундамента, так и от качества выполнения строительно-монтажных работ, поэтому проблема подготовки основания является имеет существенное практическое значение.

1.4 Неравномерные осадки по площади днища. Анализ требований нормативных документов к величинам допускаемых осадок оснований и критерии их оценки

Неравномерные осадки полотнища днища РВС, зачастую встречаются в случае некачественно уплотненного основания либо при залегании в основании резервуара слабонесущих, вечномёрзлых или водонасыщенных грунтов. Выделяют 2 основных вида осадок по площади: общая осадка центральной части днища; локальные осадки отдельных участков полотнища днища (рисунок 1.13).

Общая осадка центральной части днища

Рассмотрим механизм развития общей осадки в виде прогиба днища в центре. Днище вертикального стального резервуара любого типоразмера можно рассматривать как тонкую мембрану, так как выполняется условие (1.3) теории упругости [80]:

$$\frac{h}{D} < \frac{1}{40} \quad (1.3)$$

где h - толщина днища резервуара, м; D - диаметр днища резервуара, м.

Так как днище резервуара имеет жесткое защемление по контуру, мембрана получает наибольший прогиб в центре. Гидростатическая нагрузка поддерживается днищем не за счет изгиба, а за счет растяжения по всей толщине. Поэтому напряжениями изгиба при прогибе днища в центре можно пренебречь по сравнению с растягивающими напряжениями в его срединной поверхности. При такой осадке вертикальный стальной резервуар может нормально эксплуатироваться, однако нередко встречаются случаи, когда из-за больших растягивающих напряжений в днище происходит разрушение сварных швов полотнища днища или окрайков, а также разрыв основного металла днища [18, 25].

Требования отечественных и зарубежных нормативных документов к назначению предельной осадки центра днища представлены в таблице 1.4.

В работах [101, 103] представлены критерии оценки осадки центральной части днища резервуара. Так, Дж. Лангвелд и К. Гербер установили, что

максимальная общая деформация центральной части днища - прогиб w - определяется выражением (1.4):

$$w = \sqrt{w_0^2 + D^2 \frac{\sigma_s}{E} \frac{0,37}{[n]}} \quad (1.4)$$

где w_0 - максимальное начальное поперечное перемещение центральной части днища, м; σ_s - предел прочности стали наплавленного металла сварного соединения, определяемый при строительстве РВС, Па; E - модуль упругости стали (модуль Юнга), фунт-сила на квадратный дюйм (lbf/in²); $[n]$ - коэффициент запаса прочности, равный отношению предела прочности для данной стали к напряжениям, действующим в полотнище днища РВС, согласно [102].

Если начальный прогиб днища равен нулю, коэффициент запаса прочности равен единице, а предел прочности стали листов днища - 280 МПа, то критерий оценки осадки центральной части днища резервуара имеет вид (1.5) согласно [103] и (1.6) согласно [97]:

$$w \leq \frac{D}{44} \quad (1.5)$$

$$w \leq \frac{D}{45} \quad (1.6)$$

Таблица 1.4 - Требования нормативно-технической документации в части назначения предельной осадки центра днища РВС

Источник	Максимальная величина осадки
РД-23.020.00-КТН-283-09 ГОСТ 31385-2016	200 мм
PIP STE03020 (США)	D/50...D/100 фута
API 653 (США) BS 2654 (Великобритания) Eurocode EN 14015	предельная величина осадки определяется проектной организацией

Локальные осадки полотнища днища

Локальные осадки полотнища днища имеют форму выпуклостей. Рассматривая взаимное расположение локальной осадки и днища резервуара,

можно выделить два основных типа осадки:

1) Локальная осадка удалена от стенки РВС (рисунок 1.13): как и в случае общей деформации центральной части днища в листах полотнища днища РВС возникают большие растягивающие напряжения. В сочетании с концентраторами напряжений (дефекты сварных соединений, коррозионные повреждения и др.) локальные осадки могут привести к возникновению предельного состояния в металлоконструкциях РВС.

2) Локальная осадка в окрестностях стенки РВС (рисунок 1.14): данный тип осадки является более опасным, чем предыдущий, так как в металлоконструкциях стенки, окрайки и зоне соединения полотна днища с периферийной частью увеличиваются изгибные напряжения.

Критерий оценки локальных просядок центральной части днища резервуаров в актуальной НТД [20, 50] представлен в виде выражения (1.7):

$$w \leq 0,0308 \cdot R \quad (1.7)$$

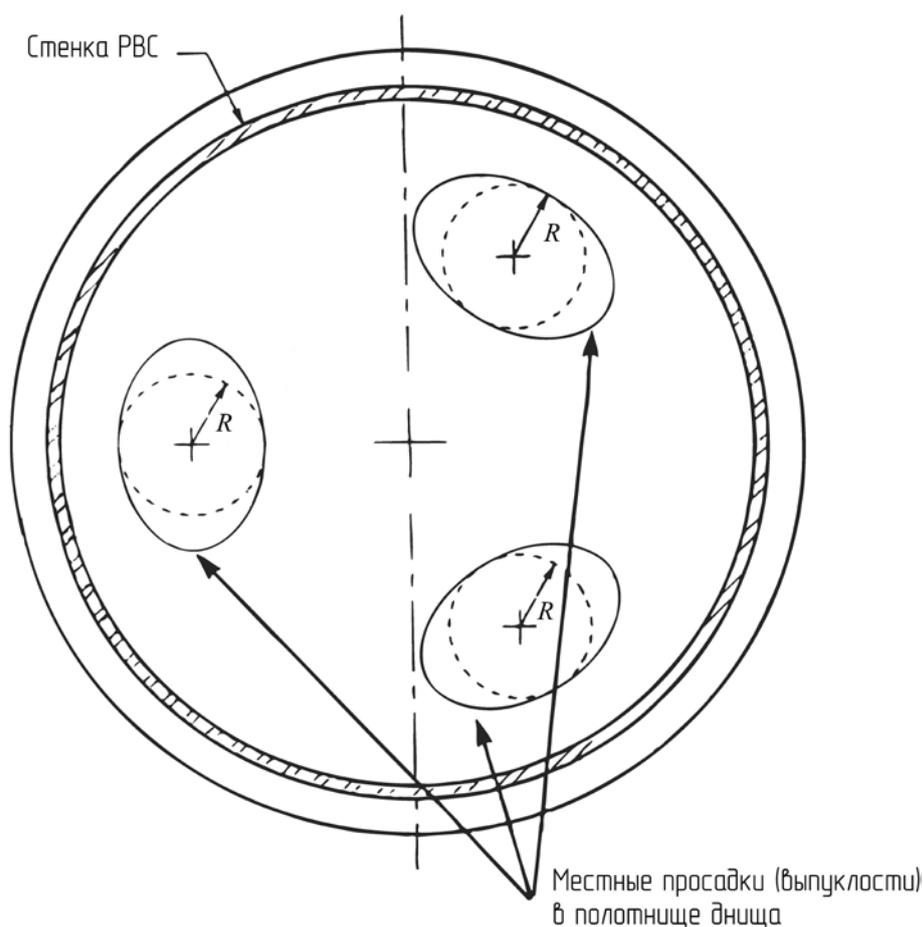


Рисунок 1.13 - Локальные осадки центральной части днища, удаленные от стенки

Согласно стандарту Американского института нефти [109] от 2009 г. предельно допустимая величина местных просядок полотнища днища, не влияющих на работу уторного узла, определяется зависимостью (1.8), графическая интерпретация которой представлена на рисунке 1.15:

$$B_B = 0,37 \cdot R \quad (1.8)$$

где B_B – максимальное значение величины вертикальной составляющей локальной осадки, дюйм; R - радиус вписанной окружности в зону локальной осадки, фут.

В случае, если локальная осадка днища располагается в окрестностях стенки РВС допустимая величина осадки назначается по результатам проведения дополнительного анализа напряженно-деформированного состояния резервуара.

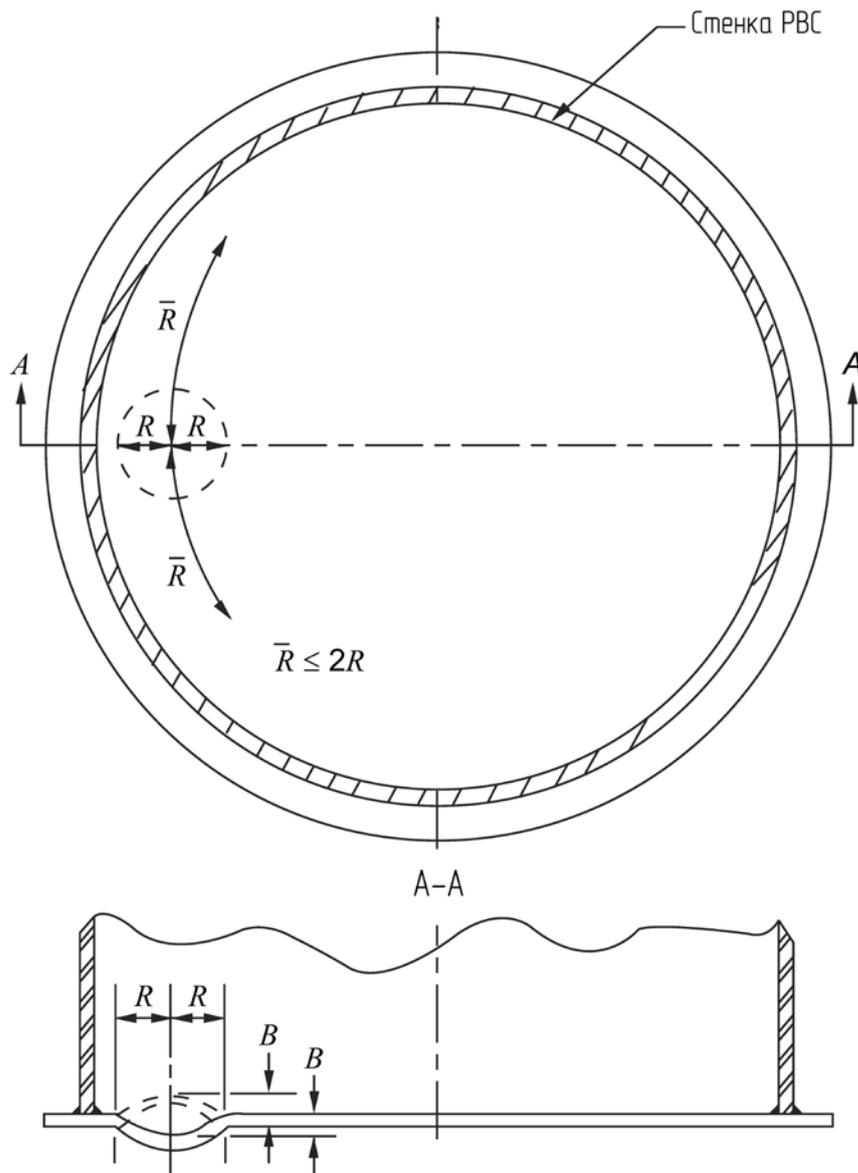


Рисунок 1.14 - Локальная осадка центральной части днища вблизи стенки РВС

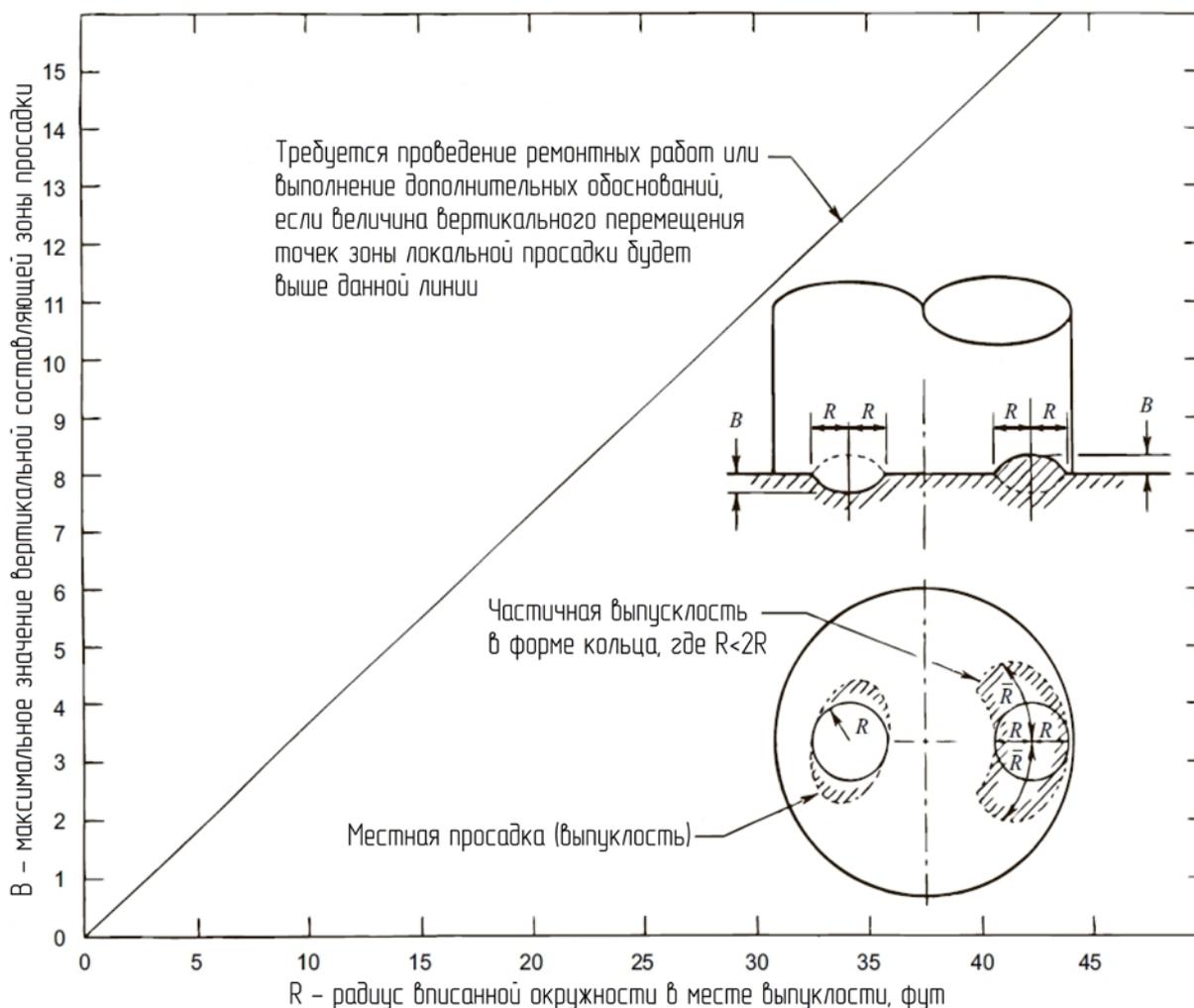


Рисунок 1.15 - Предельные значения локальных просадок полотнища днища согласно [109]

Авторы работы [108] установили наиболее рациональный критерий локальной осадки центральной части днища (1.9), располагающейся вдали от стенки:

$$S \leq d \sqrt{\frac{0,28 \sigma_{\epsilon}}{E [n]}} \quad (1.9)$$

где S – предельное значение вертикальной составляющей локальной осадки, м;
 d - диаметр участка локальной осадки, м.

По мнению авторов [108], требования к локальным деформациям днища вблизи стенки РВС следует смягчить, так как конструкция стенки РВС в виде цилиндрической оболочки способствует снижению напряжений, возникающих в листах полотнища днища резервуара при локальных просадках в окрестностях

стенки. Так, в 1974 году Ф. Губер [106] предложил требования, ограничивающие размеры локальных просадок полотнища днища вблизи стенки резервуара (1.10-1.12), имеющих «чашеобразный» профиль:

$$d < \frac{D}{4} \quad (1.10)$$

где d - наибольший диаметр локальной осадки, м.

$$\bar{d} > 2d \quad (1.11)$$

где \bar{d} - дуговой размер локальной осадки, м.

$$S \leq d \sqrt{\frac{2,25 \sigma_g D}{d^{0,75} H[n]E}} \quad (1.12)$$

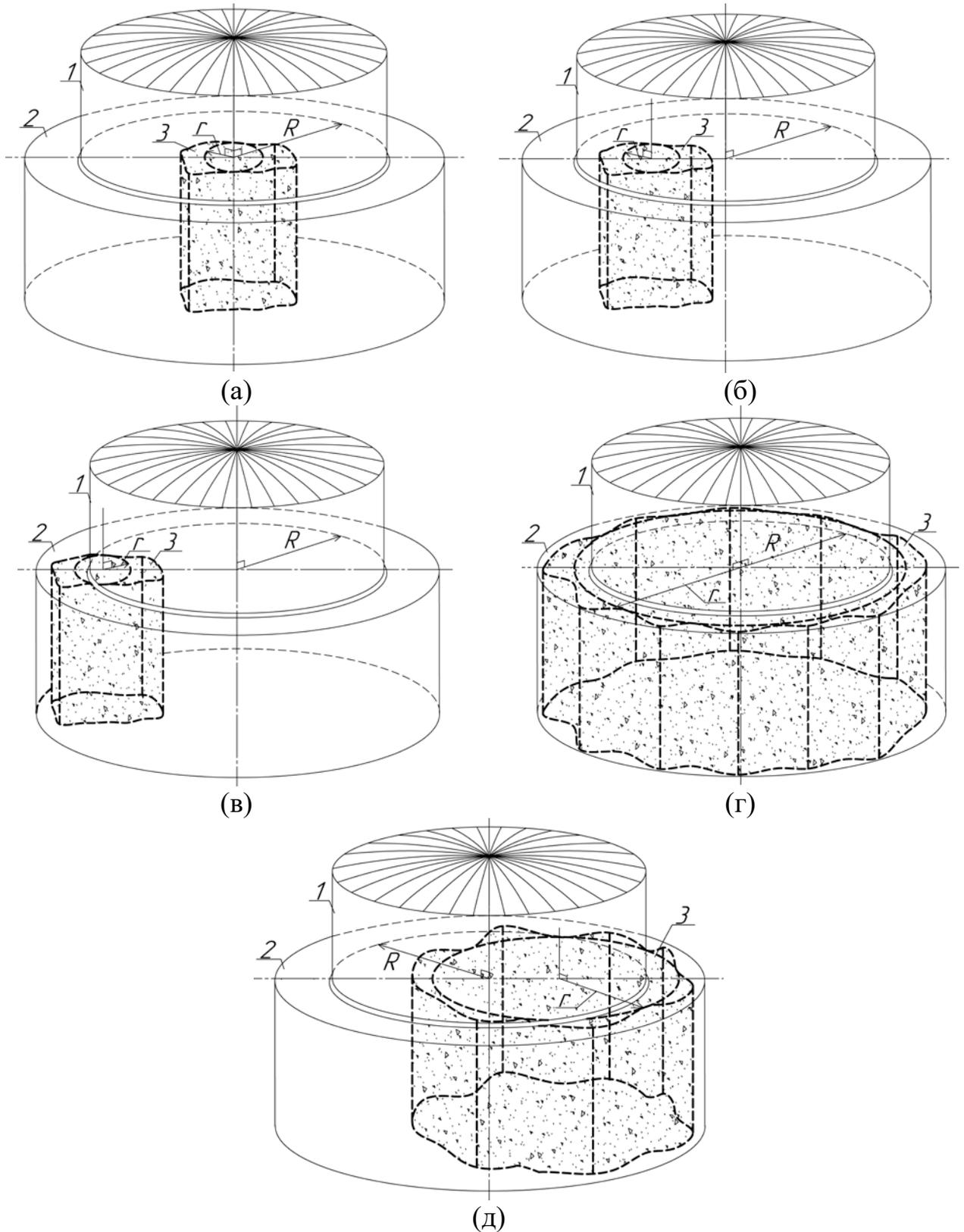
Возросшие в настоящее время объемы добычи и переработки нефти в Российской Федерации привели к увеличению не только мощности резервуарных парков, но и конструкции РВС в отдельности. Развитие данных тенденций повлекло за собой изменение габаритных размеров РВС, а именно, увеличение диаметрального размера резервуарных конструкций. Наряду с этим, площадки строительства резервуарных парков перемещаются в регионы, имеющие сложные инженерно-геологические условия со слабыми, водонасыщенными, многолетнемерзлыми и пучинистыми грунтами [65, 100]. Следует отметить, что нормативными документами [32, 33] регламентировано количество скважин, пробуриваемых при проведении инженерно-геологических изысканий: для резервуаров объемом более 5000 м³ не менее 5 скважин, для резервуаров объемом менее 5000 м³ – 4 скважины. Учитывая, что площадь оснований резервуаров может достигать 7000 м², инженерно-геологические разрезы, построенные по данным изысканий, не отражают в полной мере действительный грунтовый состав естественного основания, что приводит к появлению просадочных зон в процессе эксплуатации. В связи с этим увеличивается вероятность возникновения локальных неоднородностей в грунтовом основании при эксплуатации РВС. Отечественные и западные нормативные документы регламентируют допустимую величину локальных осадок полотнища днища РВС (таблица 1.5).

Таблица 1.5 - Требования актуальной НТД в части назначения максимально допустимых величин локальных осадок днища РВС

Источник	Критерий оценки	
ГОСТ 31385-2016 СТО-СА-03-002-2009	$w = 0,0308 \cdot r$	
API-653	Центральная часть днища	Вблизи окрестной зоны
	$B_B = 0,37 \cdot R$	дополнительный анализ НДС резервуара
BS 2654 Eurocode EN 14015	предельная величина осадки определяется проектной организацией	
где w и B_B – максимальная величина локальной осадки, мм и дюйм соответственно; r, R – радиус окружности, вписанной в область неоднородности, мм и фут соответственно.		

Анализ требований российских нормативных документов показал, что предельные величины локальных осадок определяются радиусом зоны неоднородности, а их зависимость аппроксимируется линейной функцией – как и в стандарте Американского института нефти [109]. Однако, требования западных стандартов имеют отличия в зависимости от расположения локальной осадки относительно стенки резервуара. Опыт эксплуатации цилиндрических стальных резервуаров показывает, что возможно несколько случаев развития осадок (рисунок 1.16). Так, схема (а) соответствует случаю развития осадки, не влияющей на работу уторного узла РВС, схема (б) - наоборот – локальная осадка днища затрагивает работу стенки. Случай (г) представляет собой осадку полотнища днища и его наружного контура. Важно отметить, что требования стандарта API-653 [109] при назначении максимально допустимой величины локальной осадки рекомендуют учитывать её расположение относительно стенки резервуара, в требованиях актуальной российской НТД данный фактор не учитывается. Варианты расположения областей неоднородностей основания, представленные на рисунке 1.16 (в, г, д) соответствуют случаям развития осадки наружного контура днища резервуара, однако это другая задача, более полное исследование которой представлено в работах [87, 88].

В 2010 г. решением совместного заседания Президиума Коллегии Министерства регионального развития РФ и Общественного Совета при



1 - стенка РВС, 2 - естественное грунтовое основание,
 3 - локальная неоднородности в грунтовом основании;
 R - радиус резервуара, r - радиус окружности вписанной в область
 неоднородности основания

Рисунок 1.16 - Возможные варианты расположения локальной неоднородности основания

Министерстве регионального развития РФ одобрена «Программа по гармонизации российской и европейской систем нормативных документов в строительстве». Данная программа утверждена Министром регионального развития Российской Федерации В. Ф. Басаргиным. Кроме того, согласно приказу Министерства энергетики РФ и Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 19 июля 2017 г. «Об утверждении Перспективной программы стандартизации в нефтегазовом комплексе на период 2017-2022 гг.» с целью интеграции российского нефтегазового комплекса в мировую экономику поставлена задача перевода и принятия в рамках РФ международных стандартов.

Требования приказов федерального уровня в области строительства, проведенный анализ и результаты работ [89, 100], свидетельствуют о необходимости гармонизации отечественных нормативов с международными стандартами в части оценки неравномерных осадок по площади днища вертикальных стальных резервуаров. При этом необходимо рассмотреть возможность предъявления указанных выше актуальных требований российских нормативов к резервуарам, толщина днищ которых составляет 6 мм.

1.5 Постановка задачи исследования

Анализ причин аварий вертикальных стальных резервуаров показал, что неравномерные осадки оснований являются одной из самых распространенных причин разрушения РВС. При этом обзор исследований по вопросу напряженно-деформированного состояния резервуаров при неравномерных осадках показал, что вопрос влияния осадок основания на НДС резервуаров изучен недостаточно. Исследование напряженно-деформированного состояния РВС при неравномерной осадке наружного контура днища является разновидностью данной задачи и более полно исследовано в работе [88] с применением численных методов. Существующие аналитические методы малопригодны для решения задачи деформирования металлоконструкций резервуара при неравномерной осадке основания. Поэтому решить данную задачу с учетом конструктивной жесткости

вертикального стального резервуара, возможно лишь численными методами.

Автором была поставлена задача исследовать напряженно-деформированное состояние наземного вертикального стального резервуара при развитии локальной осадки днища, вызванной областью неоднородности в грунтовом основании, располагающейся в центральной части днища и в окрестностях стенки, для случаев толщины днища 6 и 9 мм. На основе полученных результатов сформулировать предложения по изменению требований к назначению величины допустимых локальных осадках оснований, учитывающие реальный характер работы металлоконструкций резервуара, а также разработать методику оценки НДС резервуара РВС-20000 при локальной неоднородности основания.

Для решения поставленной задачи необходимо разработать численную модель резервуара, максимально детализированную, точную и соответствующую реальным проектным размерам. Для этого предлагается использовать современный программный комплекс ANSYS, реализующий метод конечных элементов. Необходимо определить краевые условия поставленной задачи, а также учесть действие различных нагрузок.

Для определения напряжений и деформаций металлоконструкций РВС с учетом действия максимальных эксплуатационных нагрузок, предложено моделировать максимально невыгодный случай неравномерной осадки – наличие области неоднородности естественного основания резервуара непосредственно под днищем РВС.

Выводы по главе

1. Анализ литературных источников показал, что причиной 46% аварий вертикальных стальных резервуаров является неравномерная осадка оснований, вызванная наличием или появлением локальной неоднородности в грунтовом массиве.

2. При изучении трудов отечественных и зарубежных ученых установлено, что аналитические зависимости без привлечения численных методов не позволяют

оценить НДС резервуара при неравномерной осадке основания с достаточной точностью.

3. Обоснована актуальность численного моделирования НДС резервуара с учетом свойств, размеров и расположения локальной зоны неоднородности в естественном основании резервуара, при максимальных эксплуатационных нагрузках, для определения предельных состояний и формулирования предложений по изменению требований нормативных документов в части определения предельных величин осадки при наличии локальной неоднородности.

ГЛАВА 2. РАЗРАБОТКА ЧИСЛЕННОЙ МОДЕЛИ ВЕРТИКАЛЬНОГО СТАЛЬНОГО РЕЗЕРВУАРА РВС-20000

2.1 Определение НДС днища резервуара аналитическим методом

Расчет прогиба днища резервуара производится в предположении о том, что полоска единичной ширины, мысленно вырезанная из днища, работает как балка на упругом основании [18, 26, 27]. Так решение задачи, связанной с деформацией днища резервуара при осесимметричном нагружении, сводится к решению дифференциального уравнения четвертого порядка (2.1) [79], имеющего вид:

$$D \frac{d^4 w}{dx^4} = p_0 - q(x) \quad (2.1)$$

где $D = \frac{E\delta^3}{12 \cdot (1 - \mu^2)}$ – цилиндрическая изгибная жесткость днища, Па;

$p_0 = \gamma_{жс} \cdot H_{жс}$ – гидростатическая нагрузка от веса столба жидкости, Па;
 $q(x)$ – интенсивность контактных напряжений под днищем, Па; δ – толщина горизонтальной полосы днища, м; E, μ – модуль упругости (Па) и коэффициент Пуассона для стали днища; $\gamma_{жс}, H_{жс}$ – удельный вес жидкости (Н/м³) и высота столба жидкости (м).

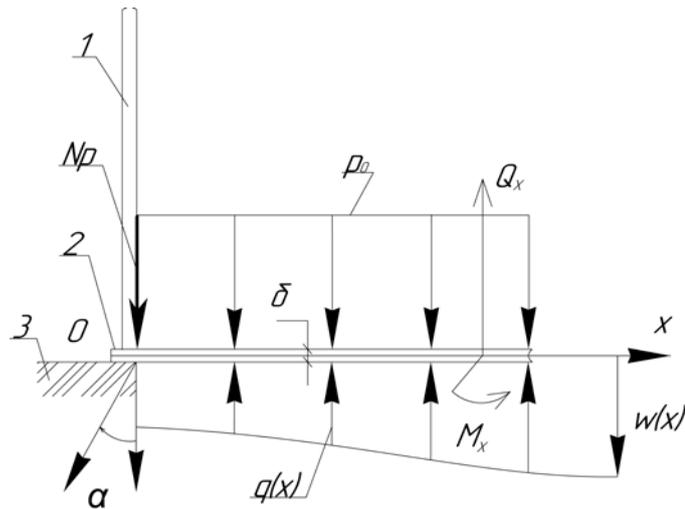
Расчетная схема для определения прогиба днища резервуара представлена на рисунке 2.1. Примем для местных упругих деформаций модель Винклера-Фусса. Из контактной модели грунтового основания, следует, что реактивные напряжения в любой точке поверхности контакта прямо пропорциональны осадке основания в данной точке [41, 48]:

$$q(x) = k \cdot w(x) \quad (2.2)$$

где k – коэффициент постели грунтового основания, Н/м³.

Подставив соотношение (2.2) и $\beta = \sqrt[4]{\frac{k}{4D}}$ в уравнение (2.1), получим:

$$\frac{d^4 w}{dx^4} + 4\beta^4 w(x) = p_0 / D \quad (2.3)$$



1 - стенка резервуара, 2 - днище резервуара, 3 - грунтовое основание;
 $w(x)$ - прогиб горизонтальной полосы днища (поперечное перемещение), м,
 $q(x)$ - интенсивность контактных напряжений под днищем, Па,
 Q_x, M_x - перерезывающая сила и изгибающий момент в днище, Н/м и Н·м,
 N_p - погонная поперечная сила от веса стенки, крыши и стационарного оборудования, Па

Рисунок 2.1 - Расчетная схема для определения прогиба днища резервуара

Решение дифференциального уравнения (2.3) имеет структуру:

$$w(x) = C_1 w_1(x) + C_2 w_2(x) + C_3 w_3(x) + C_4 w_4(x) + w^*(x) \quad (2.4)$$

где $C_1 \dots C_4$ – постоянные интегрирования, определяемые из граничных условий;
 $w^*(x)$ – частное решение неоднородного уравнения (2.3); $w_1(x) \dots w_4(x)$ – частные линейно-независимые решения однородного уравнения:

$$\frac{d^4 w}{dx^4} + 4\beta^4 w(x) = 0 \quad (2.5)$$

Подставляя частное решение однородного уравнения (2.5) в виде $w(x) = C \cdot \exp(\lambda x)$ в выражение (2.5), получим характеристическое уравнение следующего вида:

$$\lambda^4 + 4\beta^4 = 0 \quad (2.6)$$

Используя формулы Муавра для определения корней уравнения (2.6) [79], получим:

$$\begin{aligned} \lambda_1 &= \beta(1+i) \\ \lambda_2 &= \beta(1-i) \\ \lambda_3 &= -\beta(1-i) \\ \lambda_4 &= -\beta(1+i) \end{aligned} \quad (2.7)$$

Тогда решение уравнения (2.4) будет иметь вид:

$$w(x) = \exp^{-\beta x} \{C_1 \cos(\beta x) + C_2 \sin(\beta x)\} + \exp^{-\beta x} \{C_3 \cos(\beta x) + C_4 \sin(\beta x)\} + w^*(x) \quad (2.8)$$

При определении поперечных перемещений днища резервуара, с учетом ограниченности решения на бесконечности, постоянные C_3 и C_4 обращаются в нуль. Так как равномерно распределенная гидростатическая нагрузка на днище резервуара является постоянной ($p_0 = const$), то $w^* = p_0/k$. Тогда полное решение уравнения (2.8) имеет вид:

$$w(x) = \exp^{-\beta x} \{C_1 \cos(\beta x) + C_2 \sin(\beta x)\} + \frac{p_0}{k} \quad (2.9)$$

Для определения постоянных C_1 и C_2 требуется задать граничные условия.

Если предположить, что днище по контуру имеет жесткое защемление, то есть в случае заполненного резервуара угол α между стенкой и днищем равен 90° , тогда при $x = 0$:

$$\alpha = \frac{dw}{dx} = 0 \quad (2.10)$$

$$Q_x = -D \frac{d^3 w}{dx^3} = N_p$$

где N_p – погонная поперечная сила, равная погонной нагрузке от веса стенки, крыши, стационарного оборудования резервуара.

Дифференцируя уравнение (2.9) получим:

$$\frac{dw}{dx} = -C_1 \beta \exp^{-\beta x} \cdot (\cos \beta x + \sin \beta x) + C_2 \beta \exp^{-\beta x} \cdot (\cos \beta x - \sin \beta x)$$

$$\frac{d^2 w}{dx^2} = C_1 \cdot 2\beta^3 \exp^{-\beta x} \cdot \sin \beta x - C_2 \cdot 2\beta^2 \exp^{-\beta x} \cos \beta x \quad (2.11)$$

$$\frac{d^3 w}{dx^3} = C_1 \cdot 2\beta^3 \exp^{-\beta x} \cdot (\cos \beta x - \sin \beta x) + C_2 2\beta^3 \exp^{-\beta x} \cdot (\cos \beta x + \sin \beta x)$$

Из соотношений (2.10 – 2.11) определим постоянные интегрирования C_1 и C_2 :

$$-C_1 + C_2 = 0$$

$$2 \cdot \beta^3 \cdot (C_1 + C_2) = -\frac{N_p}{D} \quad (2.12)$$

$$C_1 = C_2 = -\frac{N_p}{4\beta^3 D}$$

Подставив (2.12) в уравнение (2.9) окончательно получим:

$$w(x) = -\frac{N_p}{4\beta^3 D} \cdot \exp^{-\beta x} \{\cos(\beta x) + \sin(\beta x)\} + \frac{P_0}{k} \quad (2.13)$$

Напряжения в днище определяются по формулам:

$$\sigma_x = -D \frac{d^2 w}{dx^2} \cdot \frac{6}{\delta^2} = \frac{3N_p \exp^{-\beta x} (\sin \beta x - \cos \beta x)}{\beta \cdot \delta^2} \quad (2.14)$$

$$\sigma_y = \mu \cdot \frac{3N_p \exp^{-\beta x} (\sin \beta x - \cos \beta x)}{\beta \cdot \delta^2} \quad (2.15)$$

$$\sigma_{\text{экв}} = \sqrt{\sigma_x^2 - \sigma_x \cdot \sigma_y + \sigma_y^2} \quad (2.16)$$

Для определения напряжений и перемещений днища аналитическим методом, согласно уравнениям (2.13) и (2.16), ниже приведены исходные данные и определены расчетные значения неизвестных уравнения (2.13). Для последующей верификации численной модели, выполним расчет НДС днища резервуара РВС-20000 аналитическим методом.

Исходные данные для расчета:

Радиус резервуара – $R = 22,8$ м;

Толщина листов днища – $\delta = 0,006$ м;

Удельный вес хранимой жидкости – $\gamma_{жс} = 8485,65$ Н/м³;

Высота столба хранимой жидкости – $H_{жс} = 10,88$ м;

Модуль упругости стали – $E = 2,1 \cdot 10^5$ МПа;

Коэффициент Пуассона стали – $\mu = 0,3$;

Коэффициент постели грунтового основания – $k = 3,75$ МН/м³

Расчетные значения:

Цилиндрическая жесткость днища – $D = 4,15$ кН·м;

Коэффициент гибкости днища – $\beta = 3,876$ 1/м;

Гидростатическая нагрузка – $p_0 = 92323,87$ Па;

Погонная нагрузка от веса металлоконструкций РВС – $N_p = 19,75$ кН/м.

По результатам аналитического расчета были получены графические

зависимости прогибов и напряжений по длине днища (рисунок 2.2, 2.3).

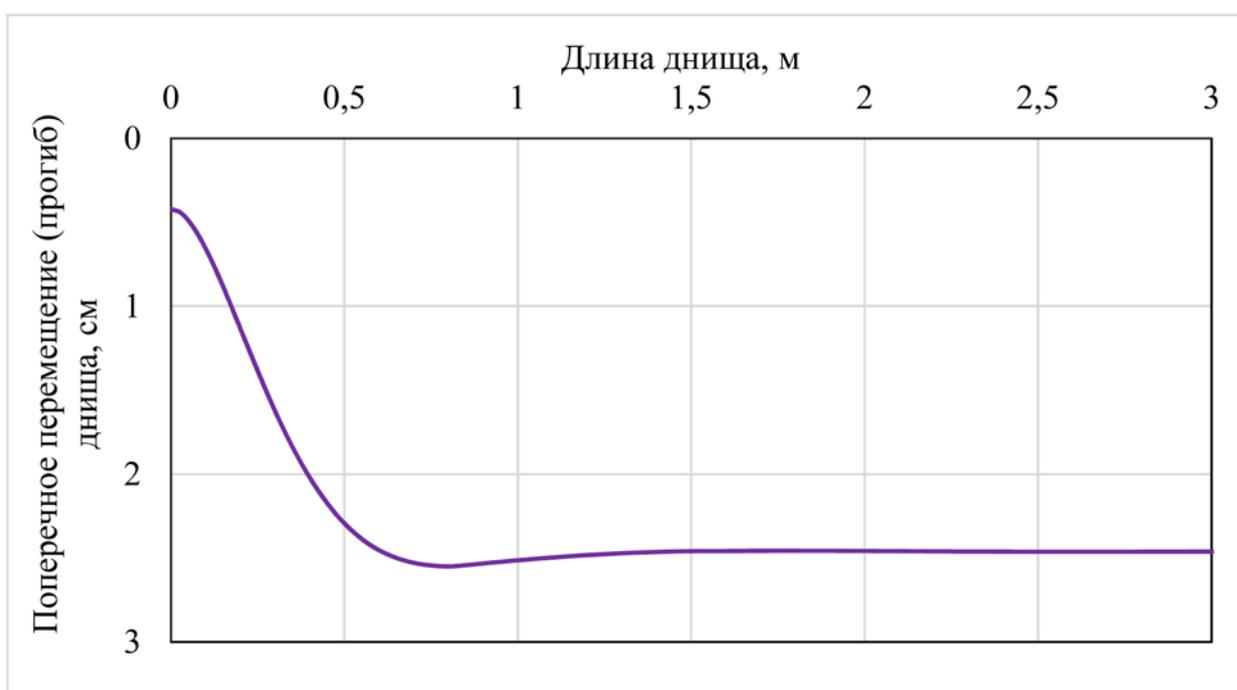


Рисунок 2.2 - График зависимости поперечных перемещений по длине днища

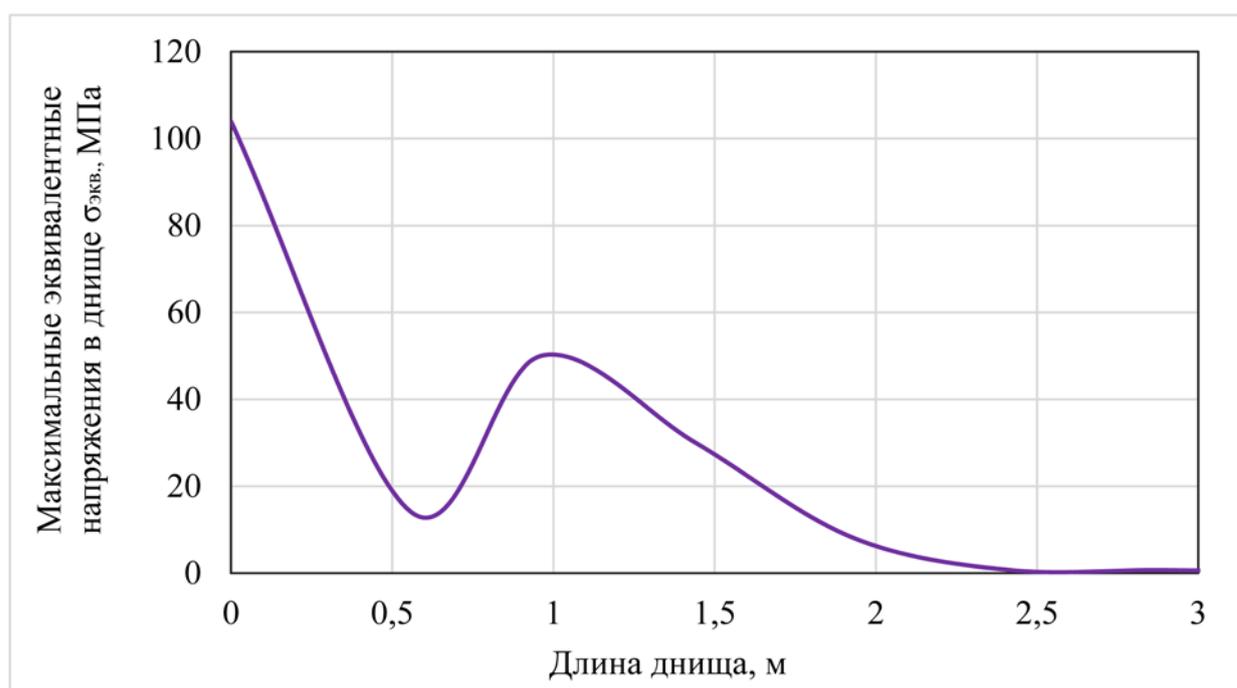


Рисунок 2.3 - График зависимости эквивалентных напряжений по длине днища

При развитии неравномерной осадки основания металлоконструкции резервуара испытывают неосесимметричные деформации. Необходимо отметить, что аналитический метод расчета напряженно-деформированного состояния резервуара не позволяет получить точные результаты расчетов в случае

неосесимметричной постановки задачи. Результаты исследований зарубежных ученых также не могут быть применены для определения параметров НДС резервуаров, построенных по отечественным типовым проектам, из-за различий в конструкциях и используемых материалах. Одним из первых решить задачу определения НДС резервуара в случае залегания области неоднородности основания в центральной части днища попытался А. С. Горелов [18]. Полученное автором решение подробно рассмотрено в разделе 2.2.

2.2 Определение НДС днища резервуара при локальной неоднородности основания с учетом распределения коэффициента постели

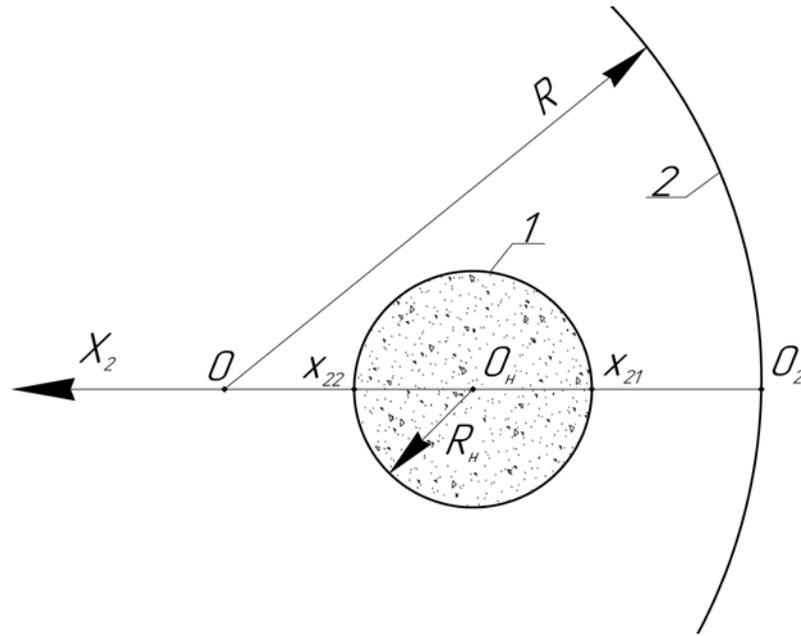
А. С. Гореловым в работе [18] исследовано влияние неоднородности грунтового основания резервуара на работу конструктивных частей РВС. Автором получено решение задачи определения дополнительного прогиба днища резервуара любого объема в области неоднородности с учетом распределения коэффициента постели в ней. Для учета распределительной способности грунта основания автор применил комбинированный способ расчета, основанный модели Винклера с переменным коэффициентом постели. По результатам расчета А. С. Гореловым был установлен закон изменения коэффициента постели под днищем РВС, обеспечивающий требуемый характер осадки.

В случае области неоднородности, расположенной за пределами краевого эффекта (рисунок 2.4), система дифференциальных уравнений, описывающих прогиб горизонтальной полосы днища единичной ширины, центральная ось которой проходит через центр неоднородности и центр днища, имеет вид:

$$\begin{cases} D_2 \frac{d^4 w_{2н}}{dx_2^4} + k_{2н}(x_2)w_{2н} = p_0 & x_{21} \leq x_2 \leq x_{22} \\ D_2 \frac{d^4 w_2}{dx_2^4} + k_2(x_2)w_2 = p_0 & 0 \leq x_2 \leq x_{21}, x_{22} \leq x_2 \leq R \end{cases} \quad (2.17)$$

где $w_{2н}(x_2)$, $k_{2н}(x_2)$ - прогиб днища в области неоднородности и соответствующий коэффициент постели, определяемые по (2.18); $w_2(x_2)$, $k_2(x_2)$ - прогиб днища за пределами области неоднородности и соответствующий коэффициент постели,

вычисляемый по (2.19) для аргумента $x = x_2$.



1 - область неоднородности, 2 - стенка резервуара;

O - центр днища, O_n - центр области неоднородности, $R = OO_2$ - радиус днища резервуара, R_n - радиус области неоднородности, x_{21} и x_{22} - координаты начала и конца области неоднородности соответственно

Рисунок 2.4 - Расчетная схема для определения дополнительного прогиба днища в области неоднородности, не затрагивающей работу уторного узла

$$k_{2n} = \begin{cases} k_2(x_2) \pm \Delta k \sin^2 \left(\pi \cdot \frac{x_2 - x_{21}}{x_{22} - x_{21}} \right), & x_{21} \leq x_2 \leq x_{22} \\ k_2(x_2), & 0 \leq x_2 \leq x_{21}, x_{22} \leq x_2 \leq R \end{cases} \quad (2.18)$$

где $k_2(x_2)$ соответствует (2.19); x_{21} , x_{22} - координаты начала и конца области неоднородности вдоль горизонтальной полосы единичной ширины, связанные между собой соотношением $x_{22} - x_{21} = 2R_n$; Δk - амплитуда изменения коэффициента постели в области неоднородности, вычисляемая путем регрессионной обработки результатов инженерно-геологических изысканий [18].

$$k_2(x_2) = k_0 \tilde{k}(x_2) \quad (2.19)$$

где k_0 - коэффициент постели центра днища; $\tilde{k}(x_2)$ - распределение относительного коэффициента по координате x_2 .

Автор установил графическую зависимость распределения относительного коэффициента постели в полярной $\tilde{k}(r)$ и декартовой системе координат $\tilde{k}(x_2)$

(рисунок 2.5), а также привел математическое описание распределения $\tilde{k}(x_2)$ по координате x_2 :

$$\tilde{k}(x_2) = 1,5708 - 2,1224\left(\frac{x_2}{R}\right) + 3,0228\left(\frac{x_2}{R}\right)^2 - 1,9616\left(\frac{x_2}{R}\right)^3 + 0,4904\left(\frac{x_2}{R}\right)^4 \quad (2.20)$$

$$0 \leq x_2 \leq R$$

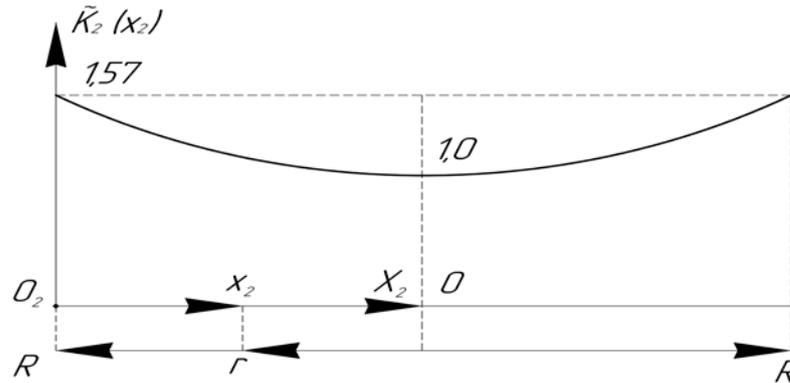


Рисунок 2.5 - Зависимость распределения относительного коэффициента постели в декартовой $\tilde{k}(x_2)$ системе координат

При решении задачи (2.17) были заданы следующие граничные условия:

$$\begin{cases} w_2(x_{2н}) = w_{2н}(x_{2н}), w_2'(x_{2н}) = w_{2н}'(x_{2н}) \\ w_2''(x_{2н}) = w_{2н}''(x_{2н}), w_2'''(x_{2н}) = w_{2н}'''(x_{2н}) \\ w_2(x_{2к}) = w_{2н}(x_{2к}), w_2'(x_{2к}) = w_{2н}'(x_{2к}) \\ w_2''(x_{2к}) = w_{2н}''(x_{2к}), w_2'''(x_{2к}) = w_{2н}'''(x_{2к}) \end{cases} \quad (2.21)$$

Практическая ценность результатов, полученных А.С. Гореловым, высока, однако их применение для расчета напряженно-деформированного состояния резервуара при локальной осадке основания не позволяет установить точные значения параметров НДС, так как полученное решение не учитывает реальную геометрическую форму конструкции РВС (в расчетной схеме отсутствует окрайка) и носит приближенный характер.

В виду того, что точное решение задачи об изгибе дна резервуара при локальных просадках его центральной части отсутствует, была поставлена задача разработать численную модель резервуара, учитывающую физическую и геометрическую нелинейность, контактное взаимодействие дна резервуара и грунтового основания, а также другие факторы, отражающие реальные условия

работы конструкции. Для создания численной модели РВС был выбран мощный программный комплекс ANSYS, использующий метод конечных элементов.

2.3 Метод конечных элементов

Метод конечных элементов (МКЭ) – численный метод решения дифференциальных уравнений широкого класса задач техники и физики. Принципиальная идея МКЭ заключается в том, что любая непрерывная величина аппроксимируется дискретной моделью, строящейся на множестве кусочно-непрерывных функций, определенных на конечном числе элементов (подобластей) [3, 30]. Процедура конечно-элементного анализа производится в следующей последовательности:

1. Дискретизация твердого деформируемого тела: исследуемая область аппроксимируется непересекающимися конечными элементами (КЭ). Вершины КЭ являются узловыми точками, предназначенными для задания компонент решения и геометрического описания КЭ. Внешние узловые точки располагаются на границах подобласти и предназначены для соединения КЭ между собой, внутренние узлы предназначены для обеспечения максимально точного описания искомых функций. Все узловые точки и конечные элементы нумеруются так, чтобы разница номеров узловых точек в конечных элементах была наименьшей. Конечное число независимых параметров в узловой точке представляет собой степени свободы, в качестве которых могут выступать производные неизвестной функции в узлах и непосредственно её узловые значения. При расчете методом конечных элементов используются одномерные (стержневые), плоские двумерные (треугольные, четырехугольные), трехмерные КЭ (тетраэдр, параллелепипед) и др. Свойства конечных элементов фиксируются с помощью постоянных и дополнительных опций. Требуется задать свойства материала, так в случае решения задач деформирования задаются такие постоянные, как модуль деформации и коэффициент Пуассона [3, 42].

2. Выбор базисных функций: как правило, аппроксимирующие функции

являются полиномами различного порядка: линейного, квадратичного, кубического и др.

3. Формирование системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ), задание граничных условий: при решении задачи в вариационной постановке СЛАУ формируется после приравнивания к 0 производных функции; при решении задачи методом взвешенных невязок производится формирование интегралов от произведения невязки на весовые функции, которые впоследствии приравниваются к 0. Интегралы по исследуемой области разбиваются на интегралы по подобластям, затем определяются элементарные векторы и матрицы, служащие основой для формирования глобальной матрицы жесткости [34].

4. Решение системы уравнений.

5. Вычисление расчетных величин (деформаций и напряжений) в КЭ.

При определении НДС резервуара, статическую задачу МКЭ удобно рассматривать в вариационной постановке Лагранжа. Основное разрешающее уравнение для задач статики имеет вид [34, 56, 88]:

$$\{F\} + \{F\}^{\sigma_0} + \{F\}^{\epsilon_0} + \{F\}^g + \{F\}^q = \{U\}[K] \quad (2.22)$$

где $\{U\} = \{\{U\}_k^1 \{U\}_k^2 \dots \{U\}_k^i \{U\}_k^n\}$ - глобальный вектор узловых перемещений;

$\{U\}_k^i$ - вектор узловых перемещений i -го узла k -го конечного элемента;

$\{F\} = \{\{F\}^{(1)} \{F\}^{(2)} \dots \{F\}^{(i)} \{F\}^{(n)}\}$ - глобальный вектор внешних узловых сил;

$\{F\}^{(i)}$ - вектор внешних узловых сил, приложенных к i -ому узлу k -го конечного

элемента; $\{F\}^{\sigma_0}, \{F\}^{\epsilon_0}, \{F\}^g, \{F\}^q$ - глобальные векторы узловых сил,

соответствующие начальным напряжениям, начальным деформациям, массовым и

поверхностным силам; $[K]$ - глобальная матрица жесткости конечно-элементной

модели;

$$[K] = \begin{bmatrix} [K]_1^{(1)} & \dots & [K]_1^{(i)} & \dots & [K]_1^{(n)} \\ [K]_1^{(1)} & \dots & [K]_2^{(i)} & \dots & [K]_2^{(n)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ [K]_j^{(1)} & \dots & [K]_j^{(i)} & \dots & [K]_j^{(n)} \\ [K]_n^{(1)} & \dots & [K]_n^{(i)} & \dots & [K]_n^{(n)} \end{bmatrix} \quad (2.23)$$

где n – количество узловых точек конечно-элементной модели; $[K]_j^{(i)} = \sum_{k \in j} [K]_k^{(i)} [M]$ – блок матрицы жесткости всей системы; $[K]_j^{(i)}$ – блок матрицы жесткости для k -го КЭ, определяющий реакции в j -ом узле от единичных перемещений в i -ом узле; $[M]$ – квазидиагональная матрица направляющих косинусов.

Разрешающее уравнение (2.22) с учетом заданных связей будет иметь единственное решение лишь в случае отсутствия возможности перемещения конструкции, испытывающей нагрузку, как абсолютно твердого тела. До учета граничных условий определитель матрицы жесткости системы (2.22) равен 0, а матрица жесткости тела является уникальной. В работах [38, 54, 67, 68] показано, что для исследования прочности и устойчивости тонкостенных оболочечных конструкций наиболее рационально использование программного пакета ANSYS.

2.4 Создание геометрической модели РВС-20000 в ПК ANSYS

Разработка геометрической модели производится в геометрическом моделировщике DesignModeller программного комплекса ANSYS, реализующем современные методы моделирования плоской и трехмерной геометрии. Верификация программного комплекса подтверждается Свидетельством № 02/ANSYS/2009 Российской академии архитектуры и строительных наук (приложение А). Для первичного построения выбирается координатная плоскость, на которой создается эскиз структурного элемента резервуара. Работа в режиме Modeling позволяет получить трехмерные тела путем применения различных операций к эскизам. В работах [76, 88] показано, что при разработке численной модели резервуара необходимо стремиться к максимальной детализации конструкции. Отсутствие соединительных элементов конструкций резервуара приводит к появлению существенных погрешностей при последующих вычислениях полей деформаций и напряжений. Поэтому для создания модели резервуара РВС-20000 максимально приближенной к реальной конструкции предлагается выполнить построение следующих структурных элементов:

центральная часть днища, крайка, стенка, кольцо жесткости, балочный каркас и настил крыши. Моделирование центральной части днища: используя команду «Line» строится отрезок заданной длины. Далее к эскизу применяется команда «Revolve», позволяющая получить тело вращения путем поворота созданного эскиза вокруг оси Z (рисунок 2.6). Аналогично выполняется моделирование крайки. Моделирование поясов стенки: для геометрического моделирования стенки строится эскиз - используя команду «Circle» строится окружность заданного радиуса. Над эскизом выполняется операция линейного выдавливания «Extrude», позволяющая получить объемное путем прямолинейного смещения на расстояние, равное высоте пояса стенки 1490 мм, в заданном направлении (рисунок 2.7).

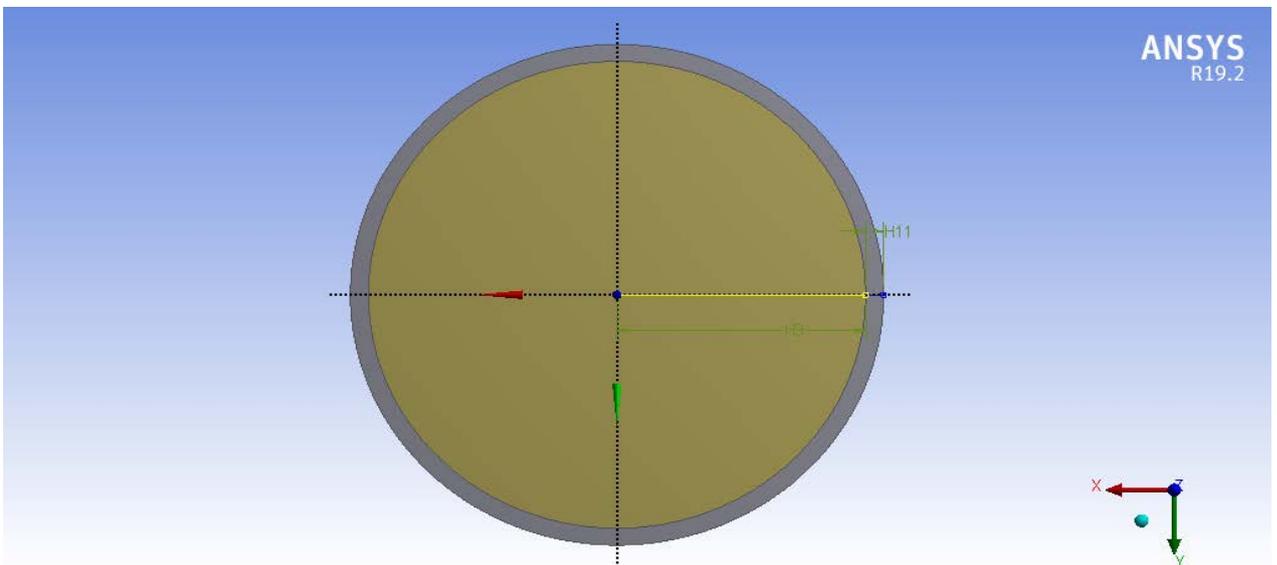


Рисунок 2.6 - Моделирование центральной части днища и крайки в ПК ANSYS

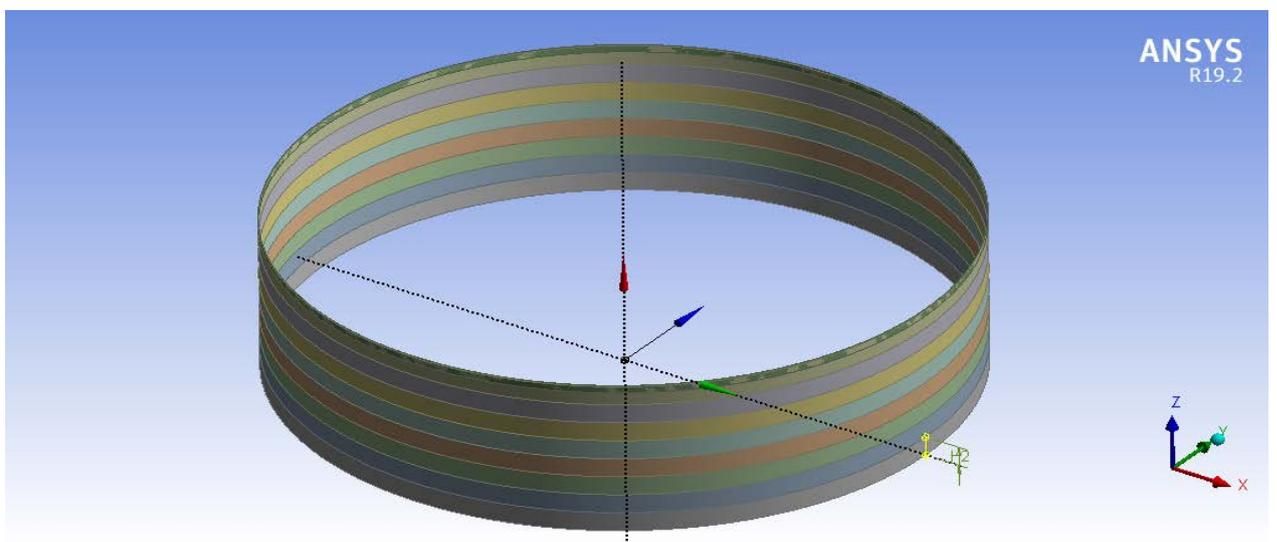


Рисунок 2.7 - Моделирование поясов стенки в ПК ANSYS

Моделирование кольца жесткости: путем применения команды «Line» строится эскиз поперечного сечения кольца жесткости, далее используя команду «Revolve» было выполнено вращение эскиза вокруг оси Z (рисунок 2.8).

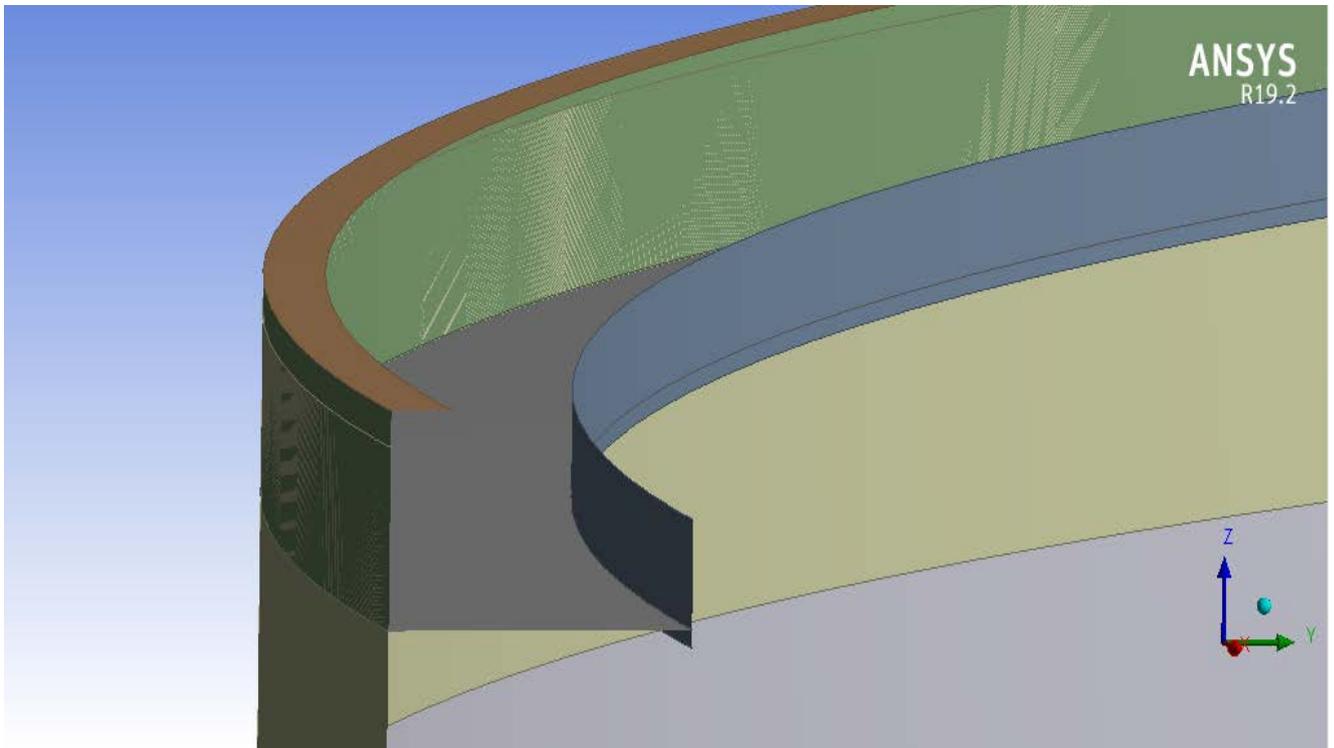


Рисунок 2.8 - Моделирование кольца жесткости в ПК ANSYS

Моделирование балочного каркаса крыши: с помощью команды «Line» был построен эскиз поперечного сечения двутавровой балки, для моделирования вальцованного профиля двутавровых балок был построен эскиз образующей заданного радиуса с помощью команды «Arc by Tangent». Далее была применена операция протяжки вдоль контура «Sweep», позволившая получить объем путем перемещения эскиза балки вдоль образующей. Моделирование уголков, выполняющих функцию поперечных связей, производилось аналогично. Помимо этого, на главных балках были созданы точки (команда «Construction Point») для построения одномерных геометрических тел (команда «Lines from Points»), выполняющих функцию промежуточных связей. В меню «Create» была выбрана функция копирования по шаблону «Pattern», позволившая получить в общей сложности 48 главных балок (рисунок 2.9).

Моделирование листового настила крыши: путем выполнения операции

«Surfaces from Edges» было произведено вращение эскиза образующей двутавровой балки каркаса вокруг главной оси Z резервуара на 360° (рисунок 2.10). Таким образом, оболочка листового настила стационарной крыши резервуара была построена на основе одномерного тела, образующего замкнутый контур.

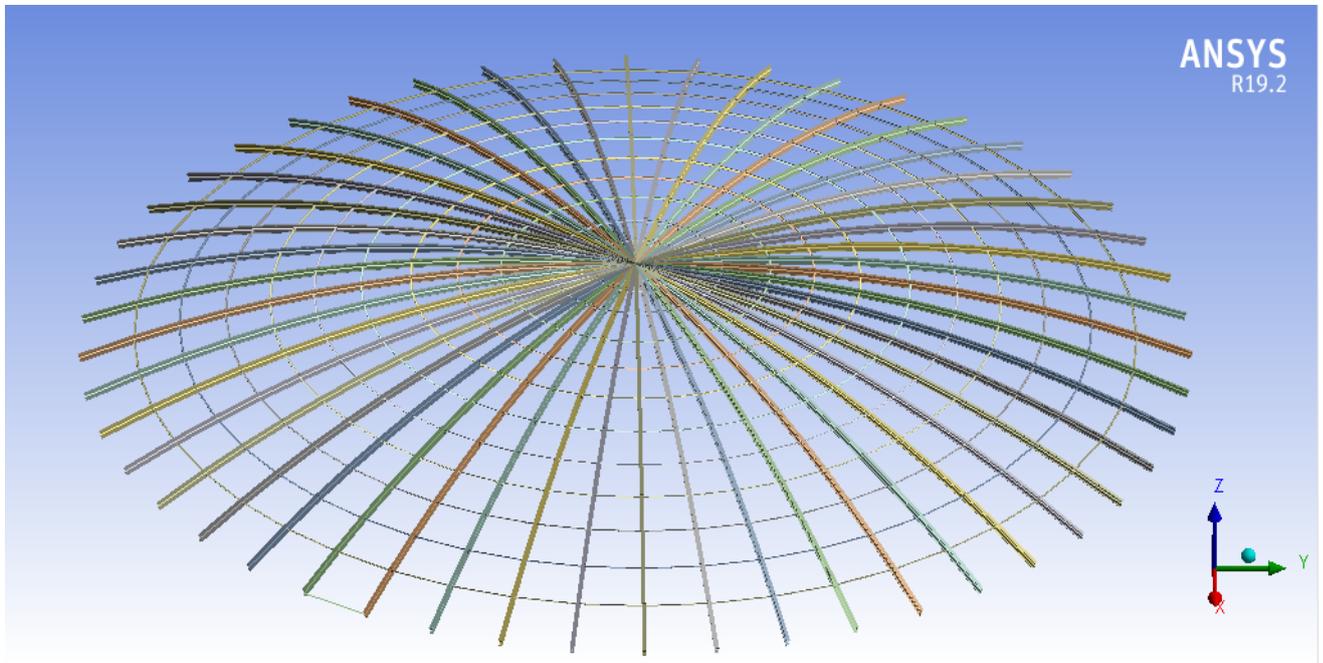


Рисунок 2.9 - Моделирование несущих и связующих балок крыши в ПК ANSYS

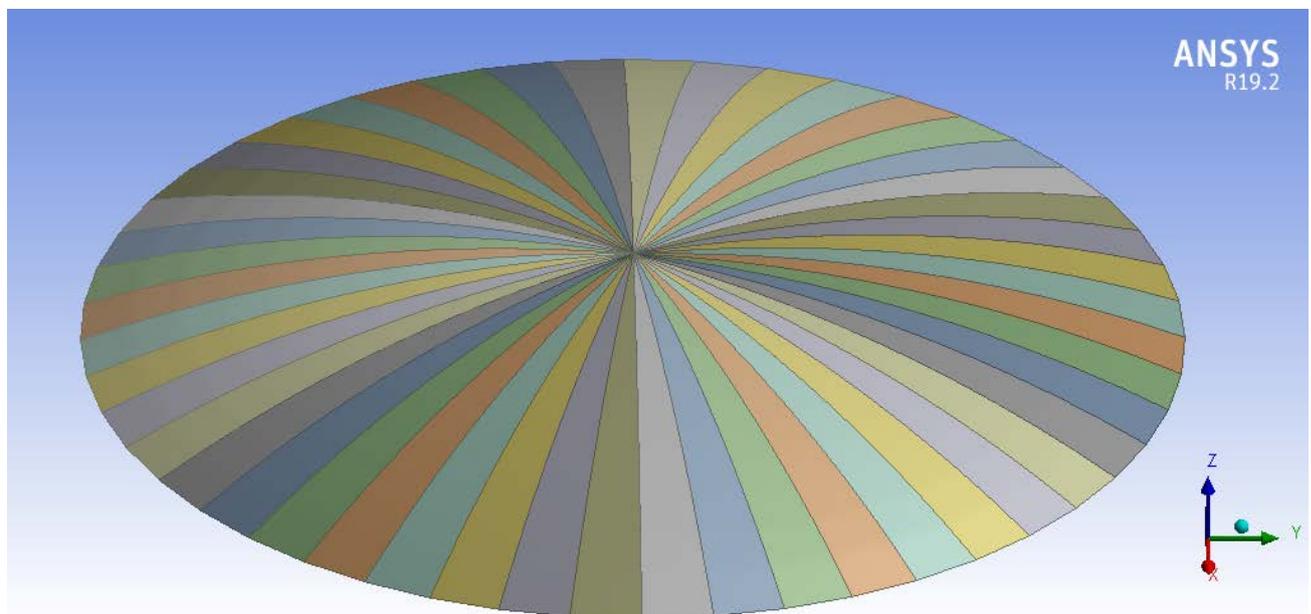


Рисунок 2.10 - Моделирование листового настила крыши в ПК ANSYS

Построение конечно-элементной модели резервуара РВС-20000 выполнялось в соответствии с действительными геометрическими размерами сооружения согласно типовому проекту ТП-704-1-60 (таблица 2.1).

Таблица 2.1 - Геометрические характеристики металлоконструкций вертикального стального резервуара объемом 20000 м³

Параметр	Ед. изм.	Значение
Высота стенки	мм	11920
Высота поясов стенки	мм	1490
Толщина первого пояса стенки	мм	13
Толщина последующих поясов (2-8 пояс)	мм	11
Диаметр резервуара	мм	45600
Высота стационарной крыши	мм	4000
Толщина окрайки	мм	9
Толщина центральной части днища	мм	6
		9
Ширина окрайки	мм	1200
Выступ окрайки	мм	60
Толщина листового настила крыши	мм	6
Несущая двутавровая балка I35Б1 (48 шт.):		
- высота сечения		346
- ширина сечения	мм	155
- толщина стенки		6,2
- толщина полки		8,5
Уголки (288 шт.)	мм	90×90

Значения толщин балочных и оболочечных конструкций, материал конструкций, его свойства, в том числе нелинейные, задавались в модуле симуляции Static Structural Mechanical. В данном модуле также производилось построение конечно-элементной сетки, рассмотренное с следующим разделе.

2.5 Генерирование сетки конечных элементов, выбор типа КЭ и контактов

Для получения численного решения необходимо произвести разбиение геометрической модели резервуара на КЭ-сетку. Сетка является основной для

составления и решения системы уравнений в матричном представлении. Процедура создания сетки состоит из 3 этапов: определение атрибутов элементов, определение управляющих параметров сетки и генерация сетки.

Первые два этапа требуют особого внимания, так как выбор типа и функции формы конечного элемента, а также плотности конечно-элементной сетки существенно влияют на точность решения. В генераторе сетки реализуется алгоритм адекватного выбора размеров КЭ, который позволяет генерировать сетку элементов с учетом кривизны поверхности модели. Кроме того, генератор сетки снабжен новейшими алгоритмами рафинирования и сглаживания размеров сетки, способствующими снижению числа элементов неудовлетворительной формы и прерываний процедуры создания сетки [59]. При большом количестве узлов сетки возрастает расчетное время и объем памяти, однако увеличивается точность вычислений. Измельчение сетки не позволяет компенсировать ошибки входных данных и допущения модели.

Так, определение оптимальной дискретности сетки является неотъемлемым этапом при её создании и оказывает влияние на точность результатов расчета. Параметры дискретизации, заданные при генерации КЭ-сетки модели резервуара РВС-20000 представлены в таблице 2.2.

Линейный оболочечный элемент «Surface Bodies» был выбран для генерирования сетки в тонких пластинах и оболочках, что соответствует таким структурным элементам резервуара, как центральная часть днища, окрайка, стенка, кольцо жесткости, листовой настил крыши. Сетка на балочном каркасе крыши создавалась с помощью линейных балочных элементов «Beam».

В процессе создания модели резервуара для каждого структурного элемента объекта был выбран тип конечного элемента: для стенки, окрайки, центральной части днища, опорного кольца в верхнем поясе стенки и листового настила стационарной крыши – оболочечный элемент SHELL 181; для несущих балок каркаса крыши – BEAM188; для связующих балок – BEAM4. Выбор данных типов конечных элементов обоснован их характеристиками [63, 96]:

Таблица 2.2 - Параметры дискретизации конечно-элементной сетки модели РВС-20000

Параметр	Ед. изм.	Значение
Фактор плотности сетки «Relevance»	-	10
Контроль формы элементов «Shape Checking»	-	жесткий
Фактор сглаживания	-	средний
Средняя длина стороны элемента «Sizing»:		
- центральная часть днища		0,4
- окрайка		0,4
- стенка		0,4
- кольцо жесткости	м	0,02-0,1
- листовой настил крыши		0,4
- несущие балки каркаса крыши		0,238
- связующие балки каркаса крыши		0,238

— тип SHELL181 – четырехугольный четырехузловой конечный элемент с шестью степенями свободы в каждом узле, применяется для расчета пластин и оболочек малой толщины. Формулировка элемента основана на определении истинных напряжений и логарифмических деформациях. Данный элемент использует метод штрафов для связи независимой степени свободы вокруг нормали с компонентами перемещений в плоскости элемента. Конечный элемент учитывает влияние поперечных сдвиговых деформаций, соответствующих формулировке Бате-Дворкина;

— тип BEAM188 – линейный двухузловой балочный элемент с 6 степенями свободы в каждой узловой точке. Применяется при решении нелинейных задач с большими деформациями. Данный элемент разработан на основе теории балки С.П. Тимошенко [79, 80], являющейся примером 1-го порядка приложения теории касательных деформаций: поперечные сдвиговые деформации считаются постоянными по всему поперечному сечению. Деформации и усилия, включая

изгибающие моменты, в поперечных сечениях рассчитываются в точках интегрирования элемента. Элемент имеет средства вывода, экстраполирующие данные объекты к узлам элемента;

— тип BEAM4 – двухузловой КЭ с шестью степенями свободы в каждом узле, имеющий свойства изменения жесткости при приложении нагрузок и больших перемещений.

Вид модели вертикального стального резервуара РВС-20000 с разбиением на конечно-элементную сетку представлен на рисунке 2.11. Типы сопряжения элементов геометрической модели, используемые при моделировании РВС-20000 представлены в таблице 2.3.

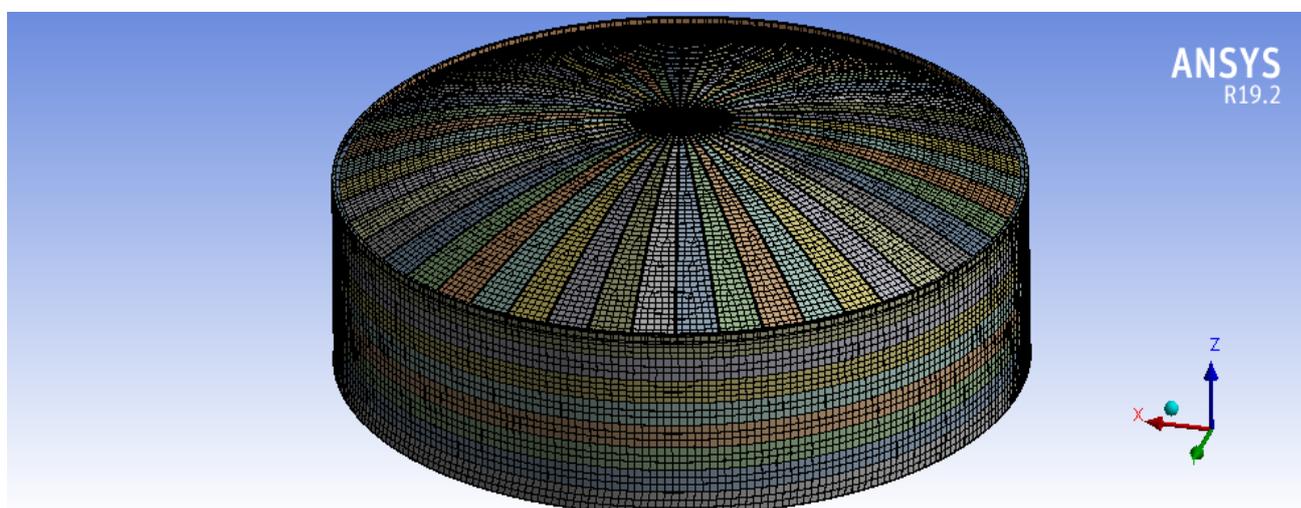


Рисунок 2.11 - Разбиение модели резервуара на конечно-элементную сетку

Таблица 2.3 - Типы контактных пар, используемых при моделировании РВС

Вид сопряжения геометрических элементов	Контактная пара	Структурные элементы модели
Face-Face	грань - грань	окрайка – центральная часть днища
Face-Edge	грань - ребро	стенка – кольцо жесткости стенка – крайка
Edge-Edge	ребро - ребро	каркас крыши – кольцо жесткости пояса стенки

В каждой контактной паре назначается контактная и целевая поверхность. В случае, если одна поверхность целевая, а другая контактная, то контакт является асимметричным. Если каждая поверхность является целевой и контактной одновременно, то контакт является симметричным. При моделировании контактных взаимодействий структурных элементов модели РВС для покрытия целевой поверхности были выбраны конечные элементы семейства «TARGE», а для контактной поверхности – семейства «CONTA». Упругое закрепление днища резервуара в контакте с грунтовым основанием выполнено с помощью конечного элемента семейства «COMBIN», а именно элемента упругого демпфера.

2.6 Задание материалов и их свойств

Резервуара РВС-20000 изготовлен из стали 09Г2С. Моделирование выполнялось в нелинейной постановке для возможности анализа возникновения зон с предельными значениями напряжений и деформаций. Выбор материалов и указание их свойств для созданной модели производилось в связанном с блоком анализа модуле управления материалами Engineering Data. В библиотеке нелинейных материалов для выполнения нелинейного анализа (General Nonlinear Materials) была выбрана сталь 09G2S. В ПК ANSYS используются законы кинематического и изотропного упрочнения для описания изменения поверхности текучести [34]. В случае определения НДС резервуара модель кинематического упрочнения может стать неадекватной для описания свойств резервуарной стали из-за больших деформаций. Так, моделирование НДС резервуара при неравномерной осадке выполняется на основе закона изотропного упрочнения, гласящего о расширении поверхности текучести во всех направлениях вследствие пластических деформаций. По заданным значениям (таблица 2.4) была построена диаграмма «напряжение-деформация» для стали 09Г2С (рисунок 2.12). Изменение модуля упругости стали E при деформировании аппроксимировано кривой, состоящей из четырех отрезков: 1 отрезок соответствует пределу пропорциональности, 2 – пределу текучести, 3 – площадке текучести, 4 – пределу

временного сопротивления.

Таблица 2.4 - Упругопластические характеристики стали 09Г2С (С345)

Характеристики стали							
$\sigma_{\text{пц}}$, МПа	$\varepsilon_{\text{пц}}$, %	$\sigma_{\text{тек}}$, МПа	$\varepsilon_{\text{тек}}$, %	$\sigma_{\text{пл.т.}}$, МПа	$\varepsilon_{\text{пл.т.}}$, %	$\sigma_{\text{в}}$, МПа	$\varepsilon_{\text{в}}$, %
320	0,0016	325	0,00363	373	0,01501	470	0,021

где $\sigma_{\text{пц}}$, $\varepsilon_{\text{пц}}$ – напряжения и деформации, соответствующие пределу пропорциональности; $\sigma_{\text{тек}}$, $\varepsilon_{\text{тек}}$ – напряжения и деформации, соответствующие пределу текучести; $\sigma_{\text{пл.т.}}$, $\varepsilon_{\text{пл.т.}}$ – напряжения и деформации, соответствующие площадке текучести; $\sigma_{\text{в}}$, $\varepsilon_{\text{в}}$ – напряжения и деформации, соответствующие временному сопротивлению.

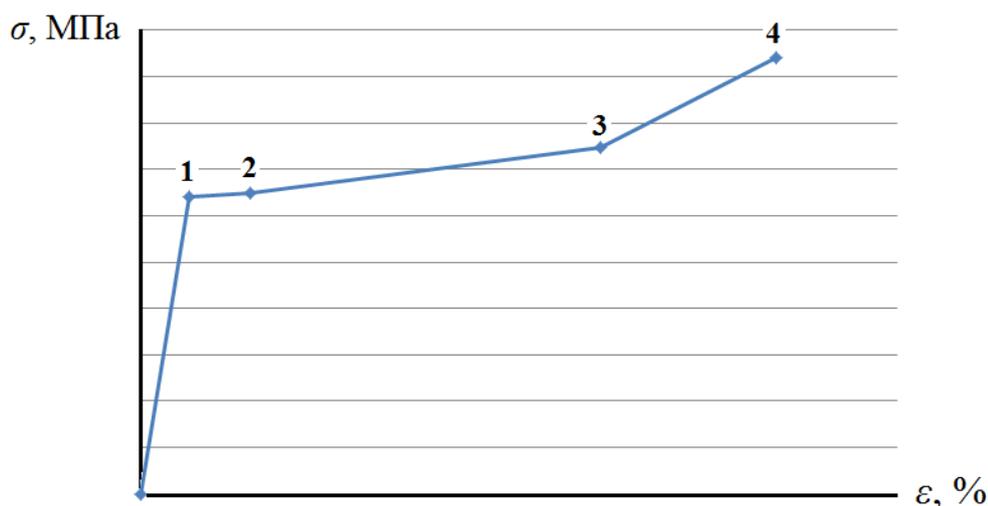


Рисунок 2.12 - Диаграмма «напряжение-деформация» стали 09Г2С (С345)

Также в модуле Engineering Data ПК ANSYS были заданы следующие свойства резервуарной стали марки 09Г2С: модуль объемного сжатия ($B = 166600$ МПа); модуль сдвига ($G = 76923$ МПа); касательный модуль ($E_k = 1450$ МПа); коэффициент Пуассона ($\mu = 0,3$).

2.7 Задание нагрузок и граничных условий

Одним из важнейших этапов подготовки к проведению прочностного анализа и получения точных вычислений является введение граничных условий и задание

внешних воздействий на тело, осуществляемое в модуле симуляции.

При эксплуатации конструкция вертикального стального резервуара подвергается различным видам нагрузок и внешних воздействий: гидростатическая нагрузка от веса хранимого продукта, избыточное давление паровоздушной среды, снеговая нагрузка, вакуумметрическое давление, вес металлоконструкций и др. Так, для моделирования силовых воздействий в ПК ANSYS были заданы инерционные и конструкционные нагрузки.

Для учета веса металлоконструкций резервуара было задано гравитационное ускорение с помощью выполнения команды «Standard Earth Gravity». Гидростатическая нагрузка от веса хранимой жидкости задавалась командой «Hydrostatic Pressure» и прикладывалась к поясам стенки и днищу. Обязательным параметром для определения гидростатического давления является параметр «Fluid Density», соответствующий плотности хранимой нефти. Моделирование избыточного и вакуумметрического давления было выполнено путем использования команды «Pressure».

Значения величин нагрузок, приложенных к конструкции, в рассматриваемой модели были заданы в соответствии с [47]:

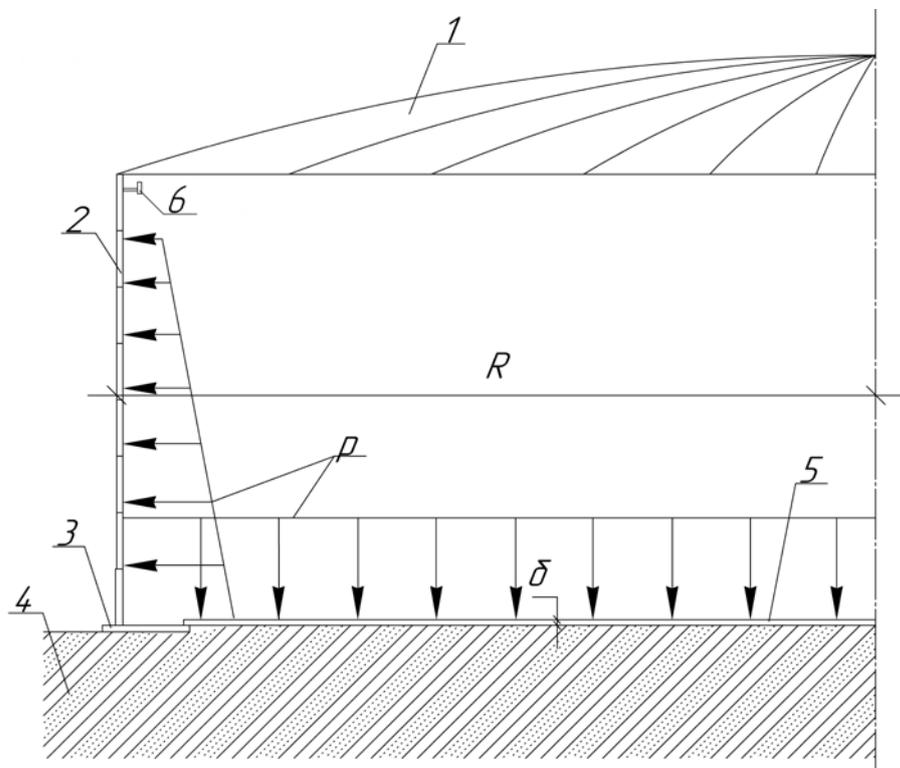
Гидростатическая нагрузка	-	92323,87 Па
Рабочее избыточное давление	-	2000 Па
Рабочее вакуумметрическое давление	-	250 Па
Вес стенки	-	1498,97 кН
Вес крыши	-	1010,43 кН
Вес стационарного оборудования на крыше	-	49,05 кН
Снеговая нагрузка	-	3200 Па

В рассматриваемой модели введено граничное условие типа «Elastic Support», соответствующее упругому закреплению днища в контакте с грунтовым основанием резервуара. Анализ возможностей ПК ANSYS показал, что для моделирования совместного деформирования днища и грунтового основания с просадочной зоной наиболее подходящей является модель основания Пастернака,

учитывающая дискретные коэффициенты постели, определяющие деформационные характеристики основания.

2.8 Решение верификационной задачи для конечно-элементной модели резервуара

Для окончательного подтверждения адекватности разработанной в ПК ANSYS конечно-элементной модели резервуара РВС-20000 была решена задача деформирования днища в осесимметричной постановке. Схема нагружения представлена на рисунке 2.13.



- 1 - стационарная крыша РВС, 2 - стенка РВС, 3 – окрайка,
 4 - грунтовое основание, 5 - полотнище днища, 6 – кольцо жесткости;
 P - гидростатическая нагрузка, R - радиус резервуара,
 δ - толщина полотнища днища

Рисунок 2.13 - Расчетная схема резервуара РВС-20000

Расчетная схема учитывает гидростатическую нагрузку от веса хранимой нефти при высоте налива 10,88 м, вес металлоконструкций резервуара и стационарного оборудования крыши, реактивный отпор грунта. Коэффициент постели грунтового основания соответствует значению, принятому при решении

задачи аналитическим методом в п. 2.1. На рисунках 2.14, 2.15 представлены графические зависимости поперечных перемещений и напряжений в днище по его длине, полученные в результате расчета численным и аналитическим способами.

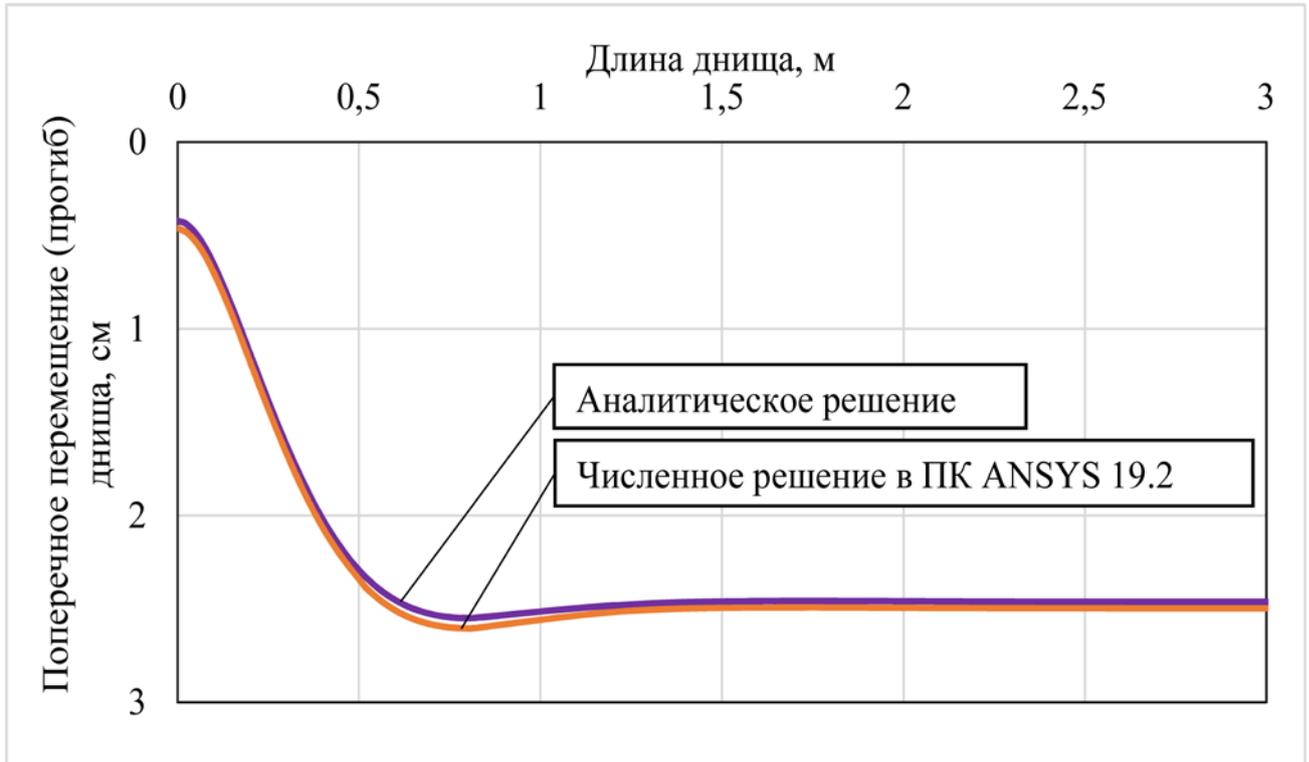


Рисунок 2.14 - Прогиб днища резервуара РВС-20000 по длине днища

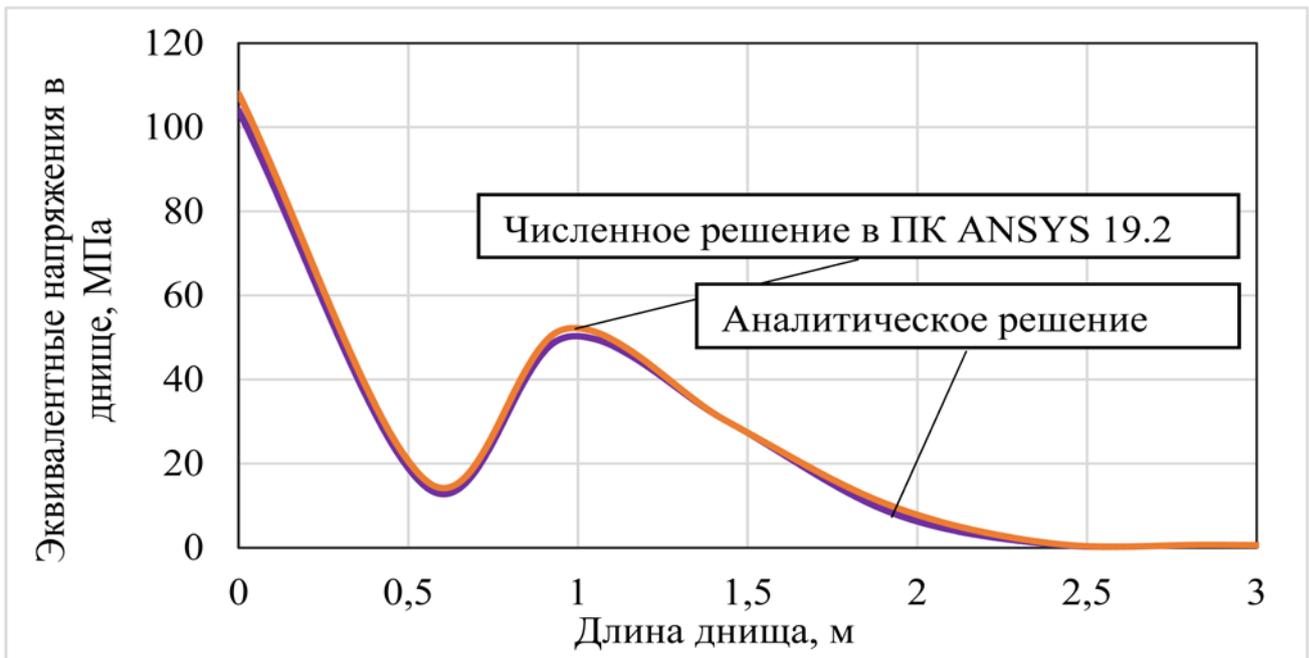


Рисунок 2.15 - Эквивалентные напряжения в днище резервуара РВС-20000 по длине днища

Отличие результатов аналитического и численного расчетов составило не

более 3%, что подтвердило достоверность результатов, полученных при расчете конечно-элементной модели РВС. Для поперечных перемещений (прогибов) днища отличие результатов составило 2,64%, для эквивалентных напряжений 2,11%.

Выводы по главе

1. В ПК ANSYS разработана и верифицирована численная модель вертикального стального резервуара объемом 20000 м³, учитывающая следующие конструктивные элементы: стенка, центральная часть днища, окрайка, кольцо жесткости, балочный каркас и листовой настил стационарной крыши. В модели учтены нагрузки, граничные условия и контактные взаимодействия, влияющие на точность вычислений при расчете НДС резервуара в неосесимметричной постановке.

2. Реализовано контактное взаимодействие днища резервуара и грунтового основания путем моделирования упругого контакта, с применением двух коэффициентов постели на основе модели Пастернака

3. Выполнена верификация разработанной численной модели РВС-20000 с точным аналитическим решением, предложенным С. П. Тимошенко. Отличие в результатах вычислений напряжений аналитическим и численным методами составило не более 3%, что свидетельствует об адекватности разработанной численной модели.

4. Разработанная модель является основой для проведения численного эксперимента и позволяет определить пределы деформирования металлоконструкций резервуара при развитии неравномерных осадок, вызванных появлением локальной области неоднородности грунтового основания.

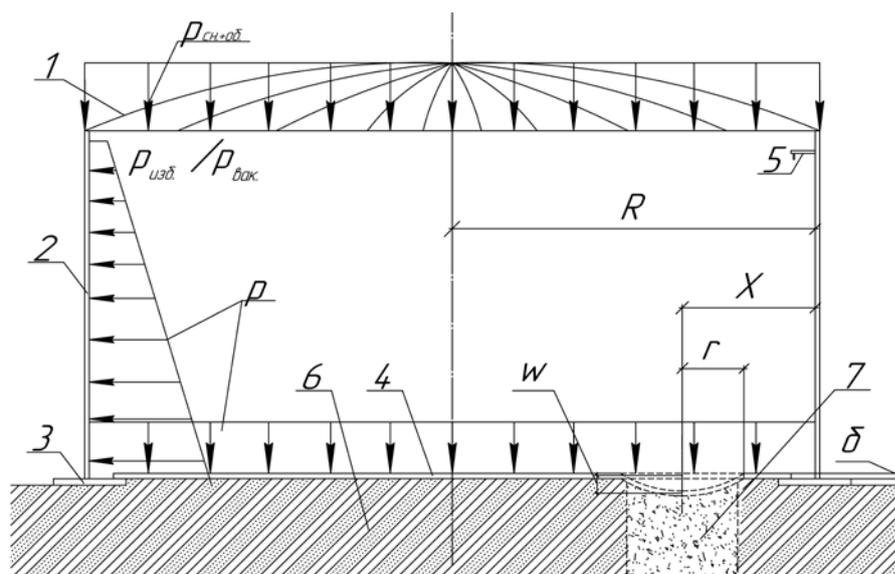
ГЛАВА 3. ИССЛЕДОВАНИЕ НДС РЕЗЕРВУАРА ПРИ ЛОКАЛЬНОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ ГРУНТОВОГО ОСНОВАНИЯ

3.1 Моделирование неравномерной осадки, вызванной областью неоднородности в грунтовом основании РВС

Обзор научных трудов отечественных и зарубежных исследователей в первой главе показал, что вопрос влияния области неоднородности грунтового основания на напряженно-деформированное состояние резервуаров исследован недостаточно. Существующие аналитические зависимости не позволяют оценить НДС резервуара при неравномерной осадке основания с достаточной точностью. Отличия в конструкции и применяемых материалах препятствуют использованию результатов исследований зарубежных ученых и требований западных стандартов для оценки НДС резервуаров отечественных типоразмеров при неравномерной осадке. Данное обстоятельство определяет актуальность численного моделирования НДС резервуара РВС-20000 с учетом свойств, размеров и расположения локальной зоны неоднородности в естественном основании резервуара. В нормативно-технической документации [20, 50] при определении допустимой локальной осадки учитывается радиус окружности, вписанной в область неоднородности. Поэтому для моделирования неравномерной осадки в грунтовом основании резервуара была создана локальная область неоднородности, имеющая форму окружности. Для области неоднородности задавались следующие геометрические характеристики: радиальный размер r и координата X , соответствующая положению её центра относительно стенки резервуара.

При моделировании осадки для учета пространственной работы грунта была использована модель грунтового основания с двумя коэффициентами постели, предложенная Пастернаком [77, 81, 85]. Данная модель позволила учесть влияние законтурного пространства, а именно учесть деформацию грунта не только в просадочной зоне, но и за контуром области неоднородности. Так, для области локальной неоднородности был задан коэффициент постели k_1 , а за пределами

области неоднородности был задан постоянный коэффициент постели $k_2 = 2 \cdot 10^8 \text{ Н/м}^3$, позволивший смоделировать подготовленное искусственно уплотненное основание резервуара. Изменение величины коэффициента k_1 при расчетах позволило смоделировать просадочную зону с различными деформационными характеристиками, от которых зависит осадка днища в области неоднородности. Задаваемый для области неоднородности коэффициент постели k_1 изменялся в интервале от $0,3 \text{ МН/м}^3$ до 5 МН/м^3 . Минимальное значение k_1 выбрано исходя из того, что в случае значения k_1 менее $0,3 \text{ МН/м}^3$ происходит потеря сходимости решения при расчете, что соответствует случаю отсутствия грунта в просадочной зоне. На рисунке 3.1 представлена расчетная схема, используемая при расчетах НДС резервуара, при неравномерной осадке основания, вызванной локальной неоднородностью основания.



- 1- крыша резервуара, 2 - стенка резервуара, 3 - окрайка днища,
 4 - центральная часть днища резервуара, 5 - кольцо жесткости, 6 - грунтовое
 основание резервуара с коэффициентом постели k_2 ,
 7 - локальная неоднородность грунтового основания с коэффициентом постели k_1 ;
 R - радиус резервуара, м, r - радиус области локальной неоднородности
 основания, X - расстояние от стенки до центра области неоднородности,
 δ - толщина днища, w - вертикальная составляющая осадки, P - гидростатическая
 нагрузка, $P_{сн.+об.}$ - нагрузка от веса снегового покрова и стационарного
 оборудования крыши, $P_{изб.}/P_{вак.}$ - рабочее избыточное и вакуумметрическое
 давление

Рисунок 3.1 - Схема моделирования локальной осадки, вызванной областью неоднородности грунтового основания

Для моделирования максимально неблагоприятного случая нагружения расчет НДС резервуара предлагается проводить при предельных величинах локальных осадок и максимальных эксплуатационных нагрузках. С целью определения максимально допустимых значений осадок днища при наличии области неоднородности в основании были определены значения максимальных эквивалентных напряжений в днище при различных радиальных размерах просадочной зоны.

При расчете были приняты следующие значения радиусов области неоднородности: $r = 1, 2, 4, 6, 8, 10$ м. Выбор такого интервала обоснован тем, что более чем в 92% случаев, резервуары, имеющие локальные осадки днища, попадают в данный диапазон значений. Все вычисления были проведены для 2 случаев толщины днища 6 и 9 мм, при расположении центра области неоднородности в центре днища, т.е. без учета краевого эффекта от стенки. В результате расчетов были получены эпюры полей распределения максимальных эквивалентных напряжений в днище резервуара при различной величине осадки. Так, на рисунке 3.2 представлены поля распределения напряжений в листах полотнища днища $\delta = 9$ мм при радиусе просадочной зоны 6 м при осадке в 200 мм.

По результатам вычислений были установлены графические зависимости максимальных действующих напряжений в днище от величины осадки в области неоднородности основания (рисунок 3.3, 3.4).

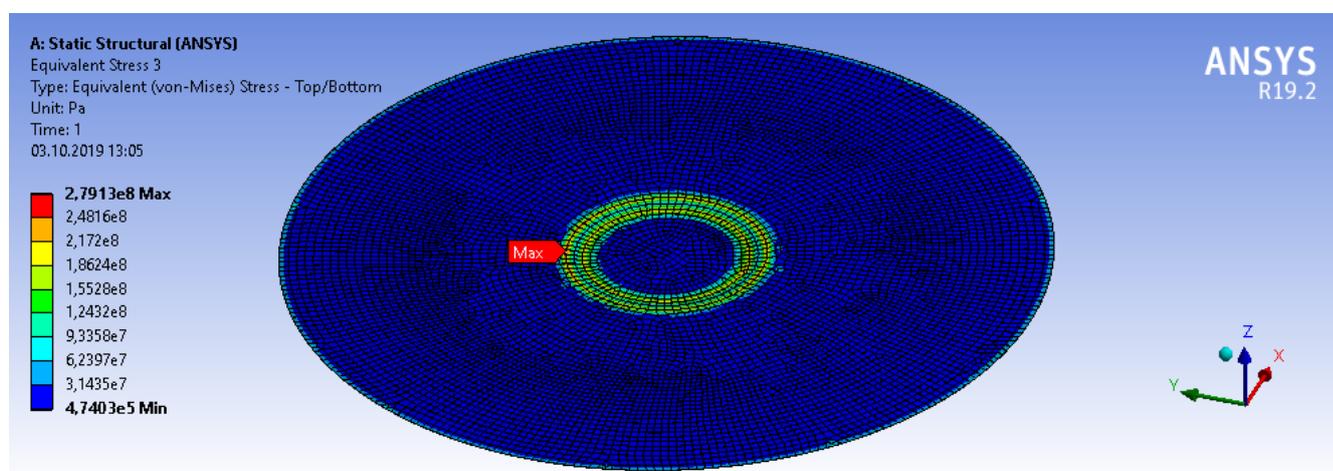


Рисунок 3.2 - Действующие напряжения в полотнище днища резервуара толщиной 9 мм при $r = 6$ м, $w_{max} = 200$ мм

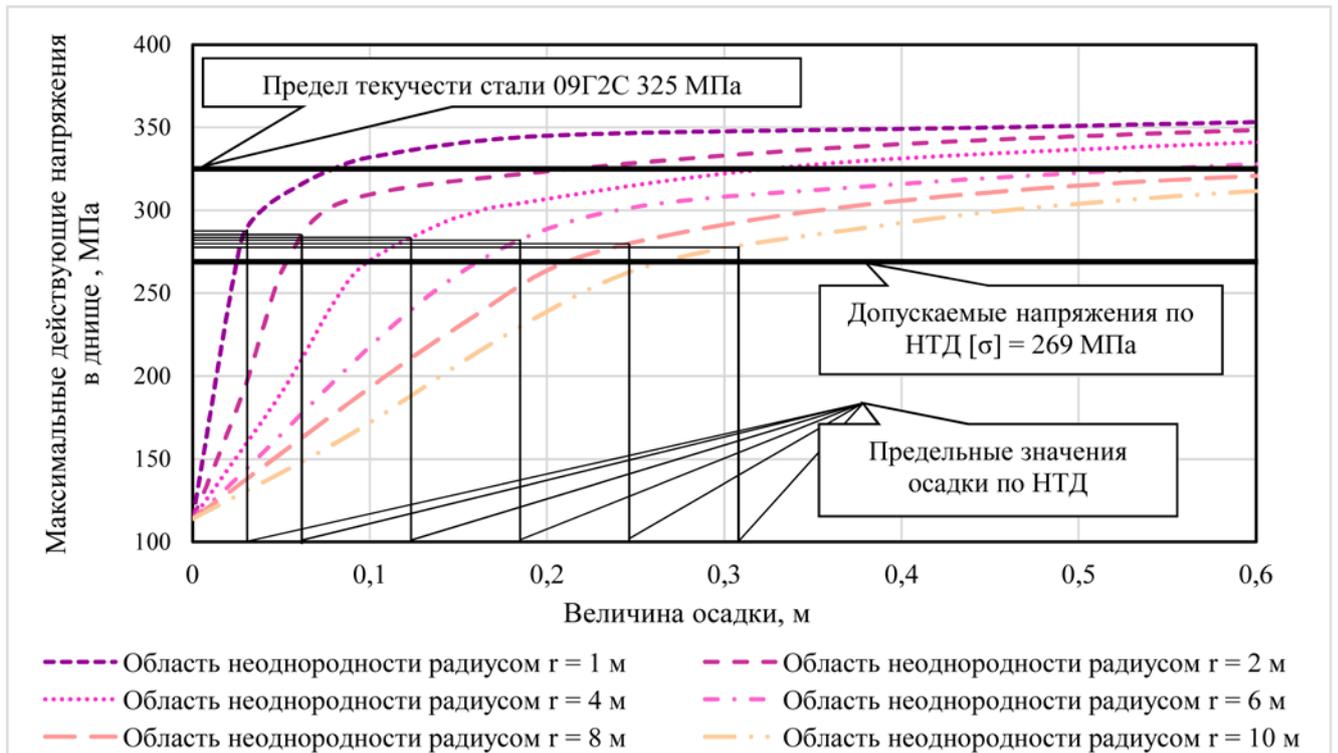


Рисунок 3.3 - Зависимости между максимальными действующими напряжениями в днище толщиной 6 мм и величиной осадки в области неоднородности

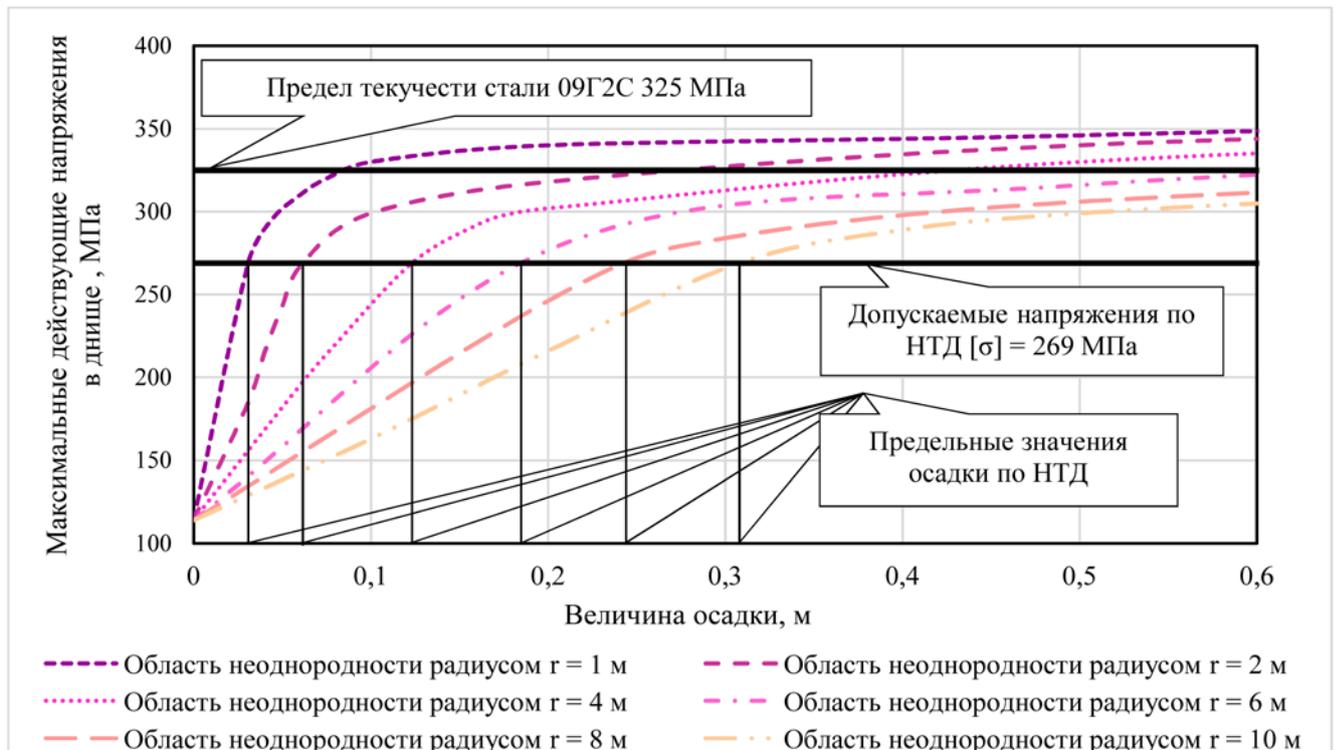


Рисунок 3.4 - Зависимости между максимальными действующими напряжениями в днище толщиной 9 мм и величиной осадки в области неоднородности

Из анализа графических зависимостей установлено, что предельные величины локальных осадок центральной части днища толщиной 9 мм ограничены

по допускаемым напряжениям $[\sigma] = 269$ МПа и соответствуют максимально допустимым значениям осадки, регламентированным действующей нормативно-технической документацией [20]. В случае толщины полотнища днища 6 мм максимальные эквивалентные напряжения в нем превышают допускаемые при предельных значения осадки согласно [20, 50]. Это объясняется тем, что требования актуальных российских нормативно-технических документов разработаны для днищ, имеющих толщину с учетом припуска на коррозию 9 мм. На основании полученных результатов была установлена зависимость максимально допустимых значений локальных осадок от их радиального размера для полотнищ днищ толщиной 6 мм:

$$f = 0,0265 \cdot r \quad (3.1)$$

Так, последующие вычисления при толщине днища $\delta = 9$ мм производились при предельных величинах локальных осадок согласно зависимости (1.6), при $\delta = 6$ мм согласно (3.1).

Для определения параметров НДС резервуара при локальной неоднородности в грунтовом основании, необходимо учесть большое количество факторов, влияющих на результаты расчетов: толщину днища, положение локальной области неоднородности относительно стенки резервуара, её радиальный размер, степень детализации модели. Поэтому для исследования НДС состояния резервуара РВС-20000 было выполнено планирование численного эксперимента согласно методике [1, 52].

3.2 Рациональное планирование численного эксперимента

Для рационального планирования численного эксперимента было выполнено сокращение количества тестовых задач путем исследования только значимых факторов эксперимента и уменьшения количества вариантов каждого фактора [29, 46]. С целью получения максимально точных результатов при минимальном числе опытов была построена четырехфакторная комбинационная схема.

При проведении численного эксперимента было учтено 4 основных

влияющих фактора:

Фактор А: степень детализации геометрической модели РВС-20000. В первом варианте модель резервуара учитывает полотнище центральной части днища, окрайку и тонкостенную цилиндрическую оболочку (стенку). Кроме того, учитывается упругое закрепление полотнища днища и окрайки в контакте с грунтовым основанием. Во втором варианте модель РВС максимально детализирована. Так, модель учитывает структурные элементы первого варианта, а также кольцо жесткости в верхнем поясе стенки, балочный каркас и листовой настил крыши.

Фактор В: толщина полотнища центральной части днища. В ходе анализа результатов вычислений в разделе 3.1, а также в статьях автора [22-24, 65] установлено, что изменение толщины полотнища днища за счет введения припуска на коррозию приводит к перераспределению действующих напряжений в металлоконструкциях РВС. По этой причине данный фактор рассматривался в двух вариантах: толщина центральной части днища $\delta = 6$ мм и $\delta = 9$ мм.

Фактор С: положение центра области неоднородности относительно стенки РВС (расстояние X). Для исследования влияния осадки днища резервуара, вызванной локальной областью неоднородности основания, на НДС конструкции резервуара в целом предложено рассмотреть данный фактор в 6 случаях. В первом случае расстояние от стенки до центра области неоднородности равно радиусу просадочной зоны - $X = r$, во втором случае – расстояние от стенки до центра области неоднородности $X = r + 2$ м, в третьем – $X = r + 4$ м, в четвертом – $X = r + 6$ м, в пятом – $X = r + 8$ м, в шестом случае – $X = r + 10$ м.

Фактор D: размер области неоднородности грунтового основания. Принимая во внимание результаты диагностики [39, 73], свидетельствующие о том, что площадь области неоднородности в основании, зачастую существенно превышает 50 м^2 , было выбрано 6 вариантов радиальных размеров области неоднородности: $r = 1$ м, $r = 2$ м, $r = 4$ м, $r = 6$ м, $r = 8$ м, $r = 10$ м.

Четырехфакторный комбинационный квадрат, представляющий собой

матрицу численного эксперимента, изображенную на рисунке 3.5.

Факторы		A ₁						A ₂					
		D ₁	D ₂	D ₃	D ₄	D ₅	D ₆	D ₁	D ₂	D ₃	D ₄	D ₅	D ₆
B ₁	C ₁	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	C ₂	■	□	□	□	□	□	■	□	□	□	□	□
	C ₃	■	□	□	□	■	■	■	□	□	■	■	■
	C ₄	■	□	■	■	■	■	■	□	■	■	■	■
	C ₅	■	■	■	■	□	□	■	■	■	■	□	□
	C ₆	■	■	□	□	□	□	■	■	□	□	□	□
B ₂	C ₁	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	C ₂	■	□	□	□	□	□	■	□	□	□	□	□
	C ₃	■	□	□	□	■	■	■	□	□	■	■	■
	C ₄	■	□	■	■	■	■	■	□	■	■	■	■
	C ₅	■	■	■	■	□	□	■	■	■	■	□	□
	C ₆	■	■	□	□	□	□	■	■	□	□	□	□

A_1 - модель РВС-20000, учитывающая полотнище центральной части днища, окрайку и стенку, A_2 - модель РВС-20000, учитывающая полотнище центральной части днища, окрайку, стенку, кольцо жесткости, балочный каркас и листовой настил крыши; B_1 - толщина полотнища центральной части днища $\delta = 6$ мм, B_2 - толщина полотнища центральной части днища $\delta = 9$ мм; C_1 - расстояние от стенки до центра области локальной неоднородности РВС $X = r$, м, C_2 - расстояние от стенки до центра области локальной неоднородности РВС $X = r + 2$, м, C_3 - расстояние от стенки до центра области локальной неоднородности РВС $X = r + 4$, м, C_4 - расстояние от стенки до центра области локальной неоднородности РВС $X = r + 6$, м, C_5 - расстояние от стенки до центра области локальной неоднородности РВС $X = r + 8$, м, C_6 - расстояние от стенки до центра области локальной неоднородности РВС $X = r + 10$, м;
 D_1 - радиус области локальной неоднородности основания $r = 1$ м,
 D_2 - радиус области локальной неоднородности основания $r = 2$ м,
 D_3 - радиус области локальной неоднородности основания $r = 4$ м,
 D_4 - радиус области локальной неоднородности основания $r = 6$ м,
 D_5 - радиус области локальной неоднородности основания $r = 8$ м,
 D_6 - Радиус области локальной неоднородности основания $r = 10$ м

Рисунок 3.5 - Четырехфакторный комбинационный квадрат

Путем отсеивания комбинаций из 144 возможных, было выполнено 84 расчета.

По результатам проведенного эксперимента был получен объемный массив значений деформаций и напряжений, возникающих в металлоконструкциях РВС-20000 при неравномерной осадке, вызванной наличием локальной неоднородности в грунтовом основании. Результаты проведенного численного эксперимента подробно представлены в разделе 3.3.

3.3 Результаты численного эксперимента, обработка результатов

Разработанные учеными модели, в предшествующих исследованиях НДС резервуаров при неравномерных осадках численными методами, имели множество упрощений. Так, в модели, разработанной И.В. Слепневым [60], не учитывалась конструкция кольца жесткости и стационарной крыши РВС, а введенное граничное условие задавало нулевые перемещения верхней кромки стенки РВС.

Впоследствии было установлено, что такой подход не отражает реальных условий работы РВС и существенно снижает точность результатов вычислений.

Рассмотрим влияние фактора (A) степени детализации модели РВС-20000 на изменение НДС конструкции. На рисунках 3.6 – 3.13 представлены эпюры распределения напряжений в конструкции резервуара при различных размерах и положениях локальной области неоднородности грунтового основания, полученные для моделей РВС-20000 с различной степенью детализации.

В таблице 3.1 приведены значения максимальных эквивалентных напряжений, возникающих в металлоконструкциях резервуара, полученные по результатам численного эксперимента для вариантов моделей РВС-20000, соответствующих фактору A . Так как по результатам расчетов был получен существенный массив данных, в таблице 3.1 приведены результаты вычислений при радиальных размерах локальной неоднородности 1, 2, 4, 6, 8, 10 м при расстоянии X равном $r, r + 2, r + 4, r + 6, r + 8, r + 10$ м.

Анализ результатов показал, что при определении параметров НДС

металлоконструкций резервуаров, особенно в случае неосесимметричного нагружения конструкции, необходимо учитывать все конструктивные элементы РВС.

Использование модели резервуара РВС-20000 с низкой степенью детализации, не отражающей реальную жесткость сооружения, приводит к снижению точности результатов. В данном случае максимальная разница результатов расчетов составила 18%.

Таблица 3.1 - Результаты расчетов НДС РВС-20000 при различной степени детализации модели

Геометрические характеристики локальной неоднородности		Модель РВС-20000 без учета кольца жесткости и стационарной крыши		Максимально детализированная модель РВС-20000	
		Максимальные эквивалентные напряжения в м/к РВС-20000, $\sigma_{\text{ЭКВ.}}$, МПа			
r , м	X , м	$\delta = 6$ мм	$\delta = 9$ мм	$\delta = 6$ мм	$\delta = 9$ мм
10	r	468,1	439,2	406,0	376,7
8	$r + 2$	349,8	319,4	318,3	298
6	$r + 4$	213,6	206,5	188	184,1
4	$r + 6$	173,3	164,1	173,3	164,1
2	$r + 8$	173,3	164,1	173,3	164,1
1	$r + 10$	173,3	164,1	173,3	164,1

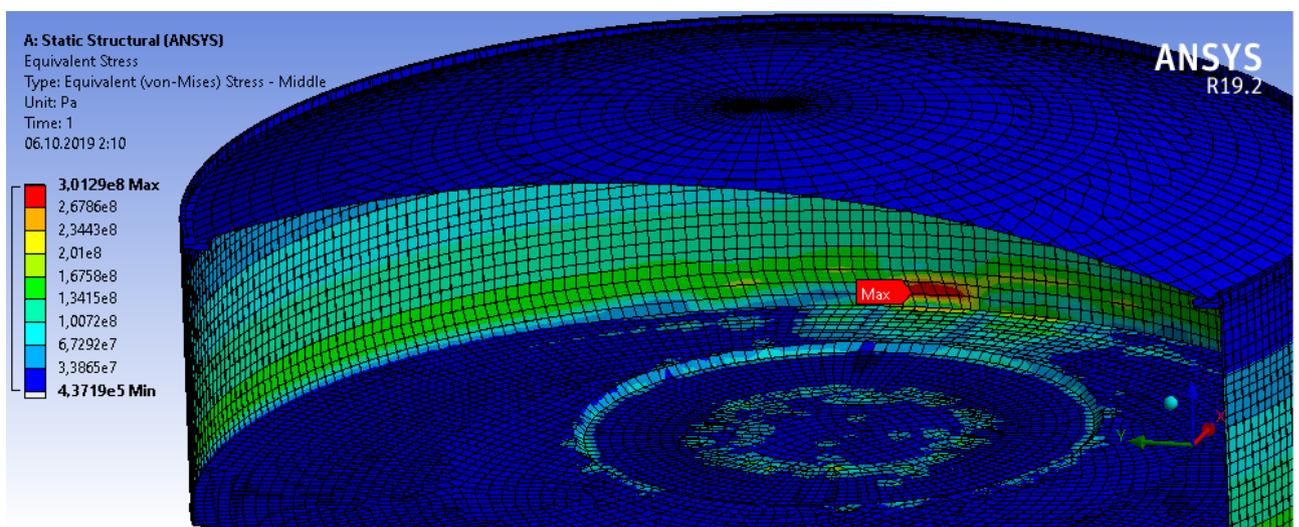


Рисунок 3.6 - Максимальные эквивалентные напряжения в конструкции РВС-20000 при $\delta = 6$ мм, $r = 10$ м, $X = r + 4$ м

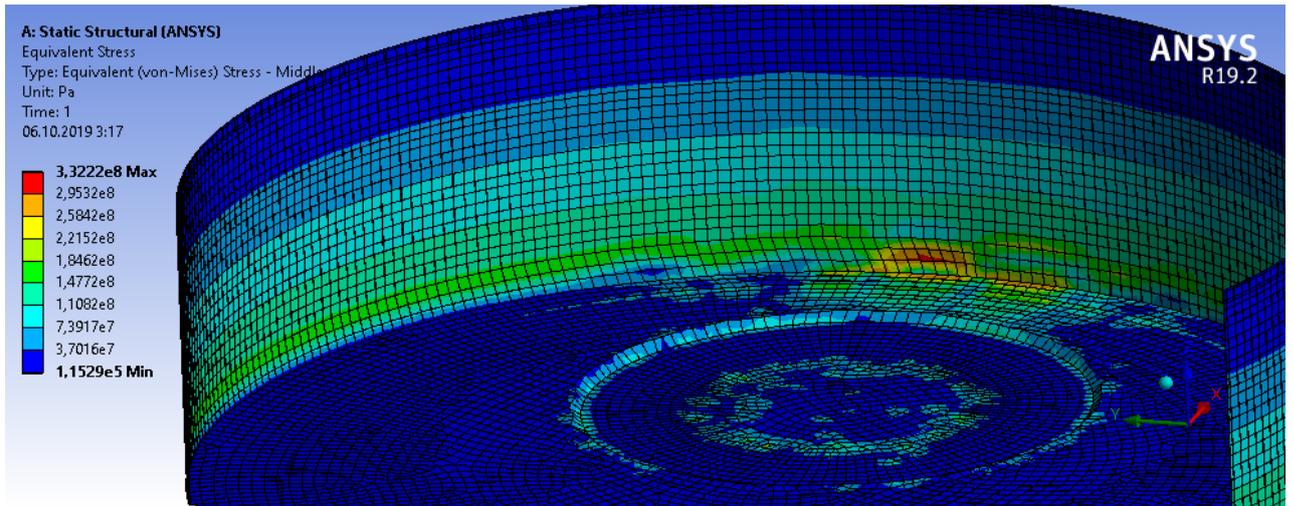


Рисунок 3.7 - Максимальные эквивалентные напряжения в конструкции ПВС-20000 $\delta = 6$ мм, $r = 10$ м, $X = r + 4$ м (модель без кольца жесткости и стационарной крыши)

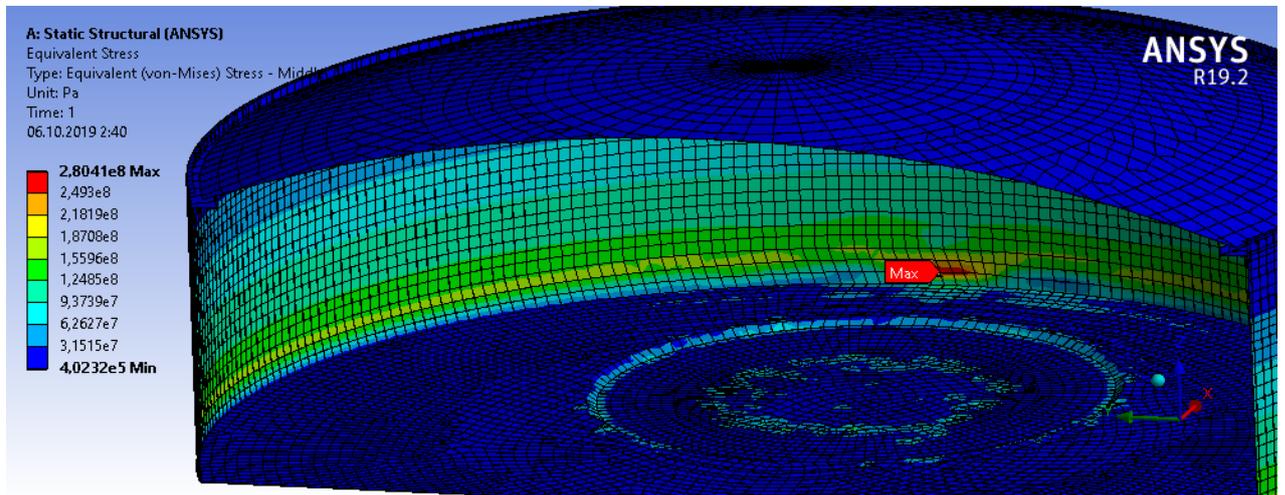


Рисунок 3.8 - Максимальные эквивалентные напряжения в конструкции ПВС-20000 $\delta = 9$ мм, $r = 10$ м, $X = r + 4$ м

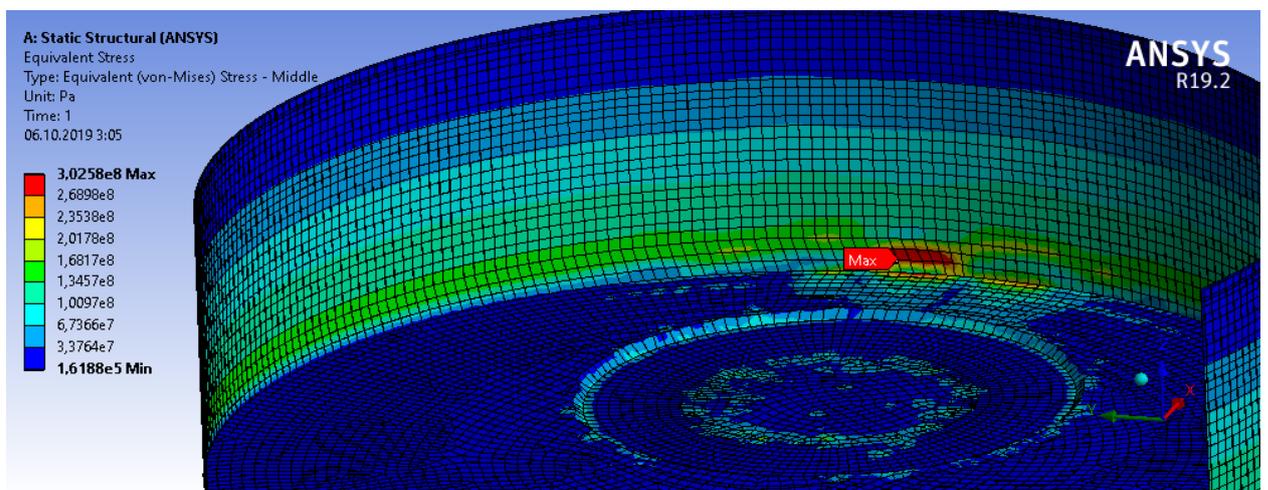


Рисунок 3.9 - Максимальные эквивалентные напряжения в конструкции ПВС-20000 $\delta = 9$ мм, $r = 10$ м, $X = r + 4$ м (модель без кольца жесткости и стационарной крыши)

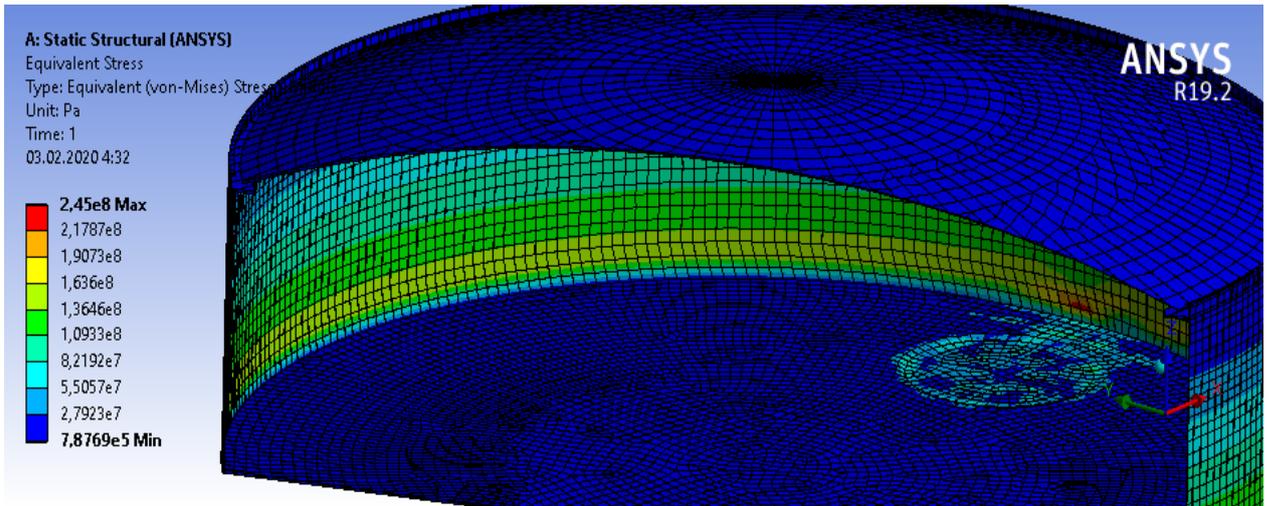


Рисунок 3.10 - Максимальные эквивалентные напряжения в конструкции РВС-20000 при $\delta = 6$ мм, $r = 4$ м, $X = r + 2$ м

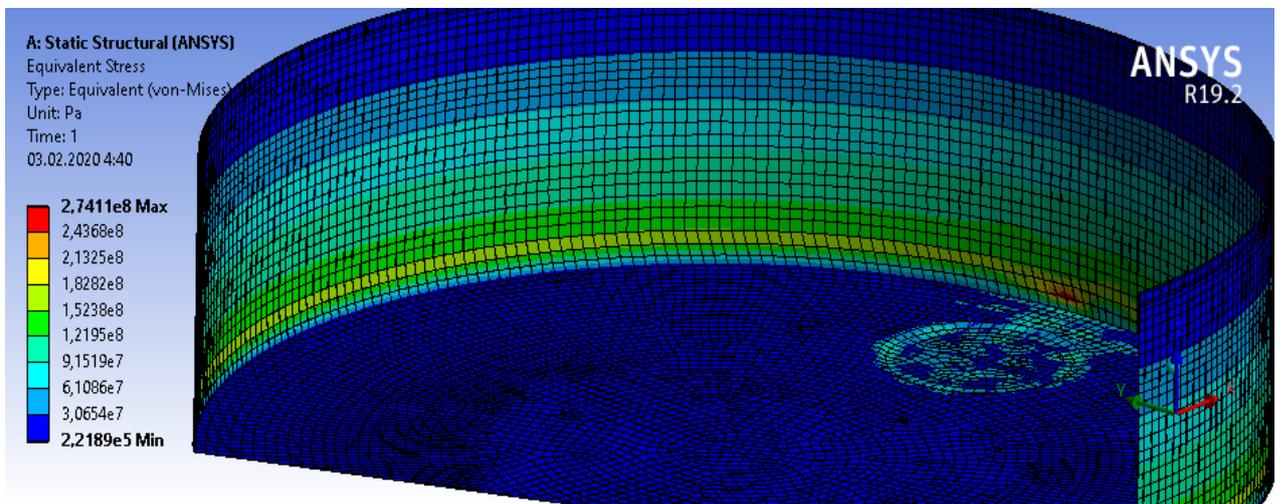


Рисунок 3.11 - Максимальные эквивалентные напряжения в конструкции РВС-20000 при $\delta = 6$ мм, $r = 4$ м, $X = r + 2$ м (модель без кольца жесткости и стационарной крыши)

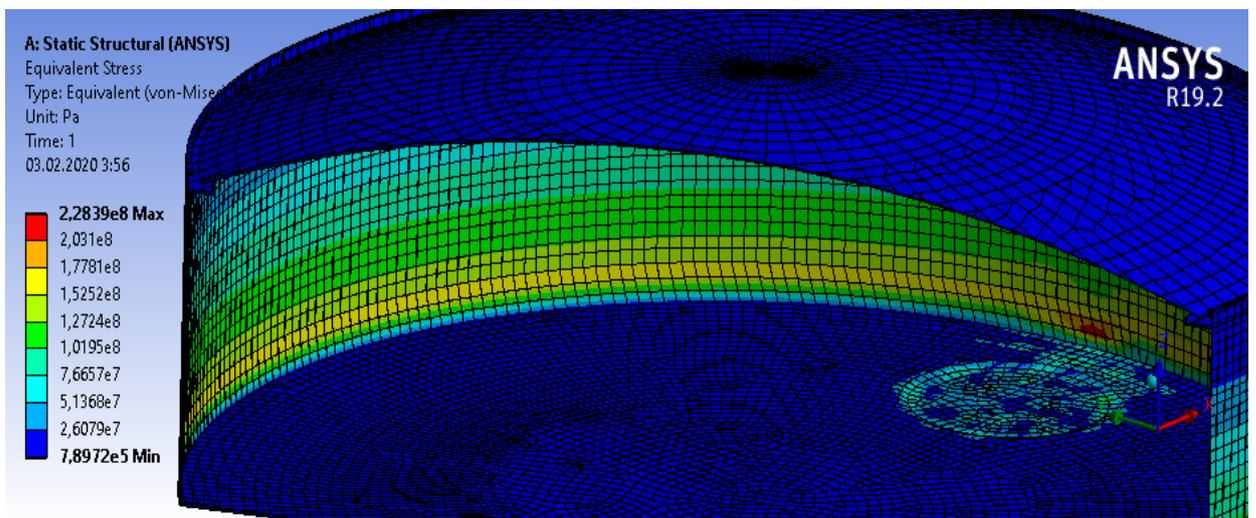


Рисунок 3.12 - Максимальные эквивалентные напряжения в конструкции РВС-20000 при $\delta = 9$ мм, $r = 4$ м, $X = r + 2$ м

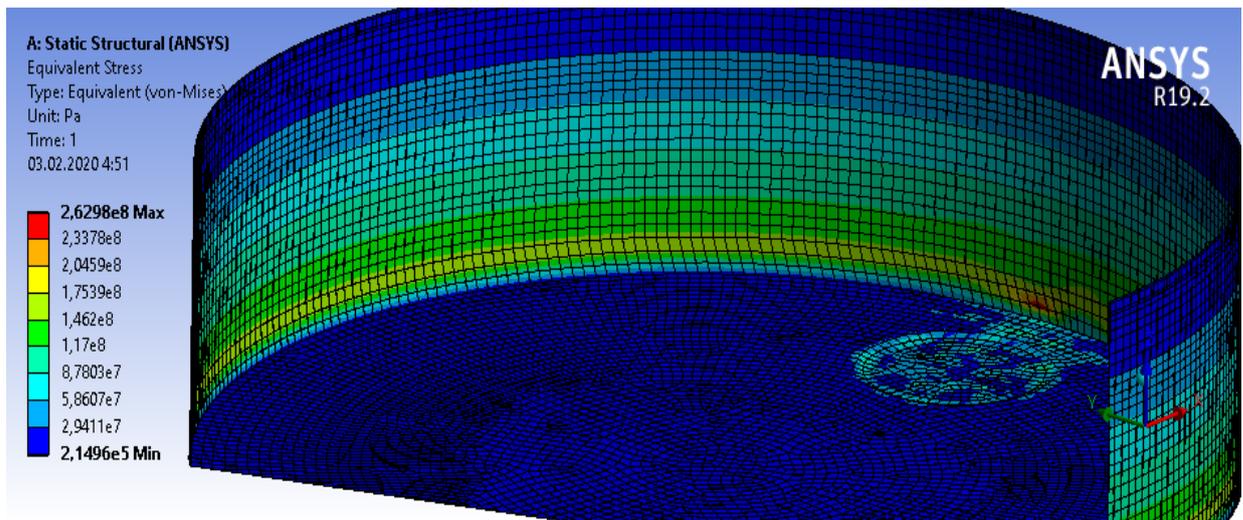


Рисунок 3.13 - Максимальные эквивалентные напряжения в конструкции РВС-20000 при $\delta = 6$ мм, $r = 4$ м, $X = r + 2$ м (модель без кольца жесткости и стационарной крыши)

Обратимся к фактору (С) положения центра области неоднородности относительно стенки РВС. Согласно стандарту Американского института нефти [109] требования к назначению предельной величины вертикальной составляющей локальной осадки центральной части дна, вызванной областью неоднородности основания, зависят от расположения зоны осадки относительно стенки РВС. Требования отечественной НТД не учитывают данный фактор при назначении величины локальной осадки.

Учитывая, что оболочечная конструкция резервуара обладает большой цилиндрической жесткостью, введем предположение о том, что при расположении области неоднородности вблизи стенки локальная осадка вызовет появление напряжений в ней. Так, была поставлена задача вычислить напряжения, возникающие в металлоконструкциях РВС-20000, при различных вариантах расположения локальной неоднородности относительно стенки РВС. Для этого были выполнены расчеты НДС резервуара РВС-20000 для случаев расположения центра области неоднородности от стенки на расстоянии $X = r$ м, $X = r + 2$ м, $X = r + 4$ м, $X = r + 6$ м, $X = r + 8$ м, $X = r + 10$ м. Расчеты выполнялись для радиальных размеров локальной неоднородности грунтового основания 1, 2, 4, 6, 8 и 10 м.

Для моделирования максимально невыгодного случая нагружения расчеты были выполнены при максимальных эксплуатационных нагрузках и предельных

значениях осадки на основе максимально детализированной модели (фактор A_2).

На рисунках 3.14 – 3.19 представлены эпюры распределения напряжений в металлоконструкциях РВС при $r = 6$ м и $r = 10$ м, при различных вариантах расположения области неоднородности.

По результатам постпроцессинговой обработки были установлены зависимости максимальных эквивалентных напряжений в металлоконструкциях РВС от расположения локальной области неоднородности грунтового основания для обоих вариантов фактора В, соответствующего толщине полотна днища (рисунок 3.20, 3.21).

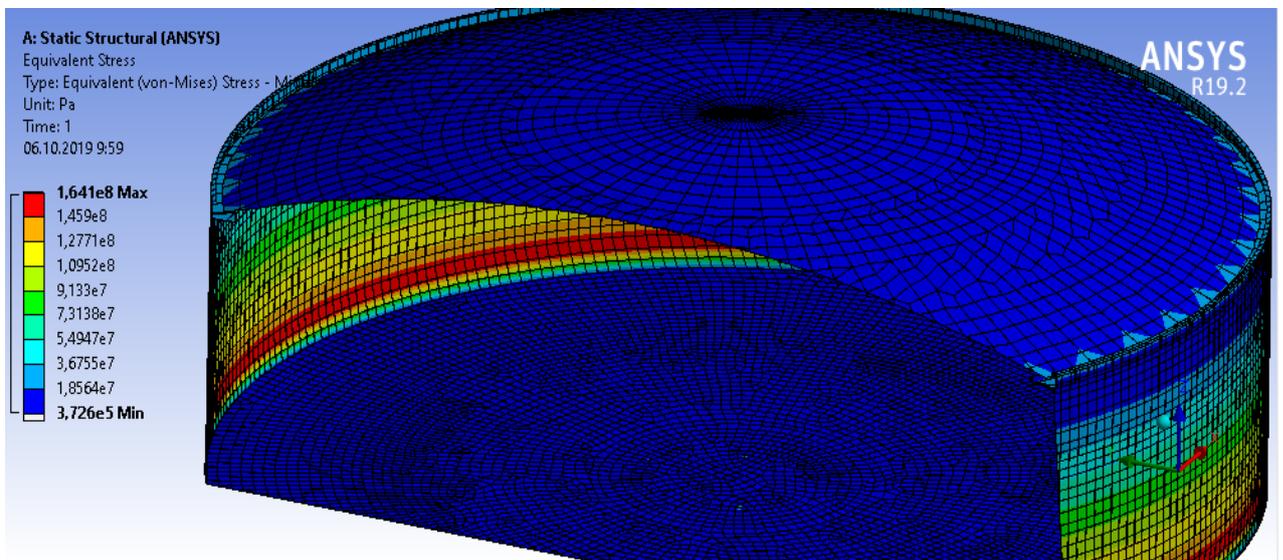


Рисунок 3.14 - Максимальные эквивалентные напряжения в стенке резервуара при $\delta = 6$ мм, $r = 6$ м, $X = r + 10$ м

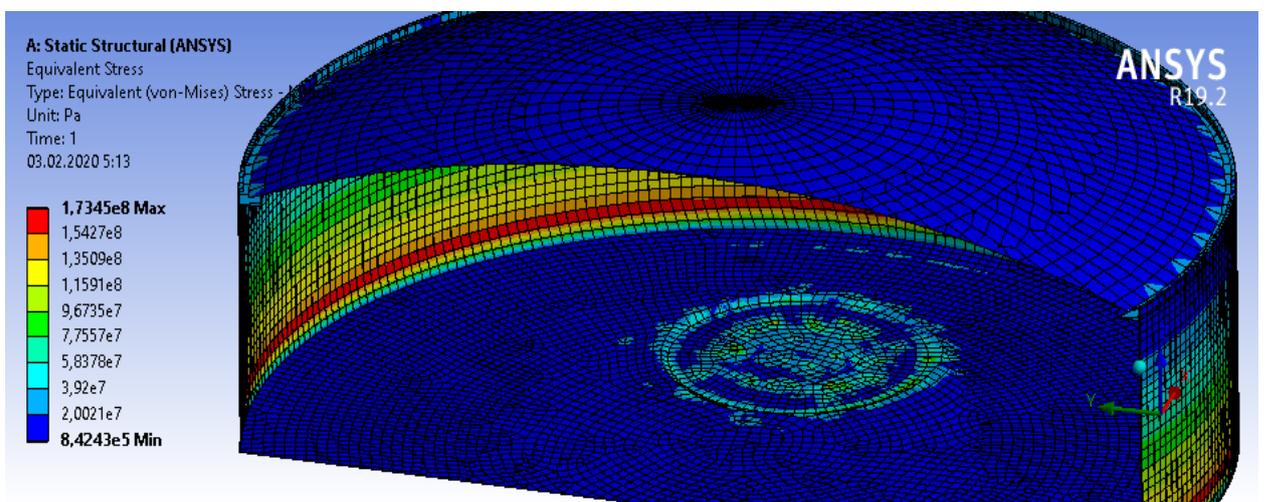


Рисунок 3.15 - Максимальные эквивалентные напряжения в стенке резервуара при $\delta = 6$ мм, $r = 6$ м, $X = r + 6$ м

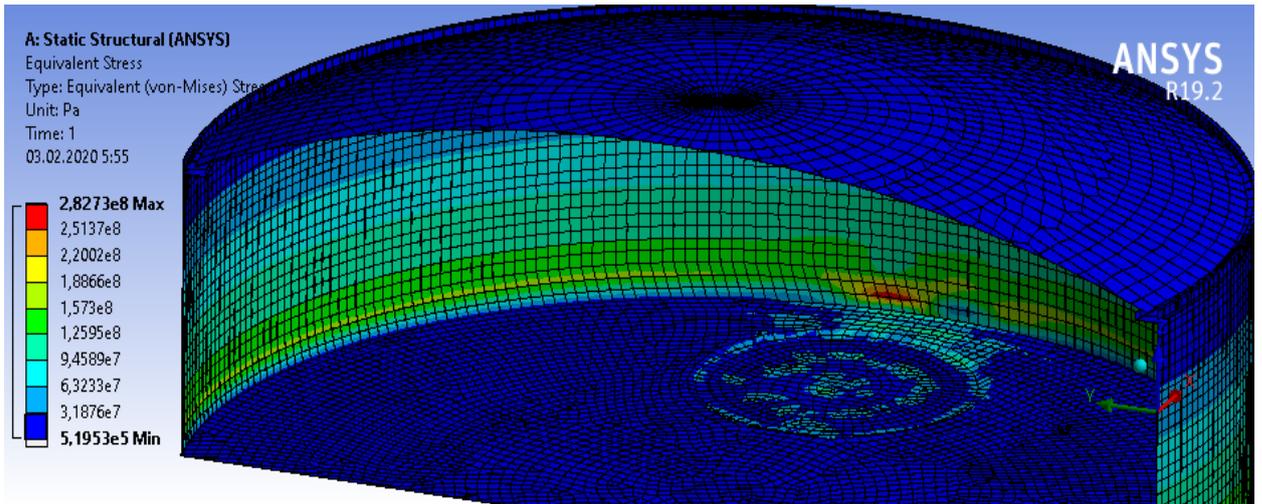


Рисунок 3.16 - Максимальные эквивалентные напряжения в стенке резервуара при $\delta = 6$ мм, $r = 6$ м, $X = r + 2$ м

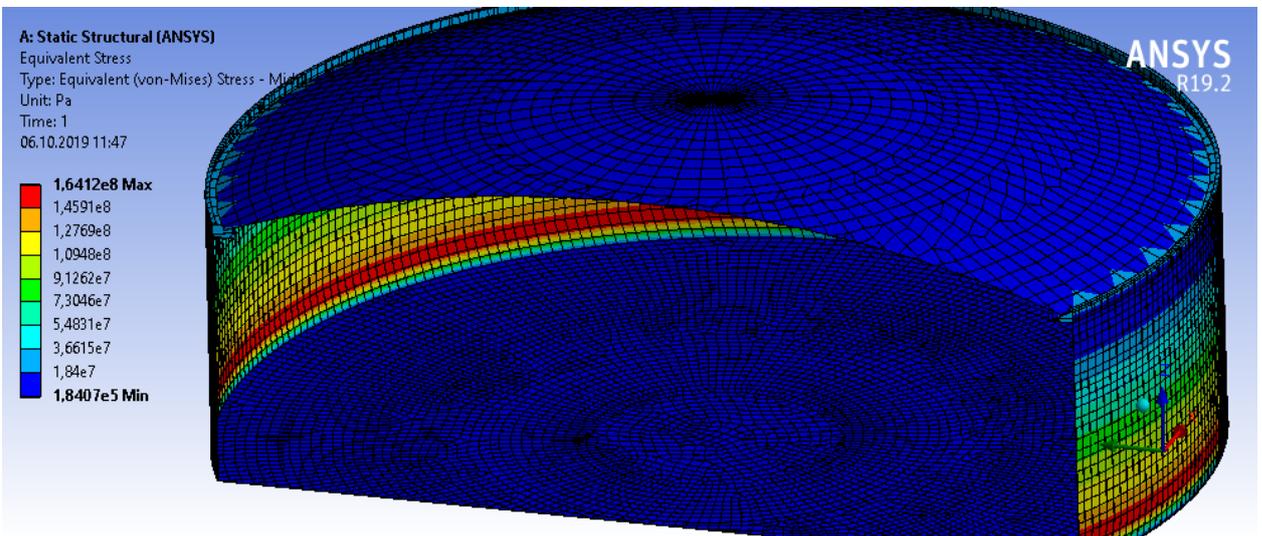


Рисунок 3.17 - Максимальные эквивалентные напряжения в стенке резервуара при $\delta = 9$ мм, $r = 10$ м, $X = r + 10$ м

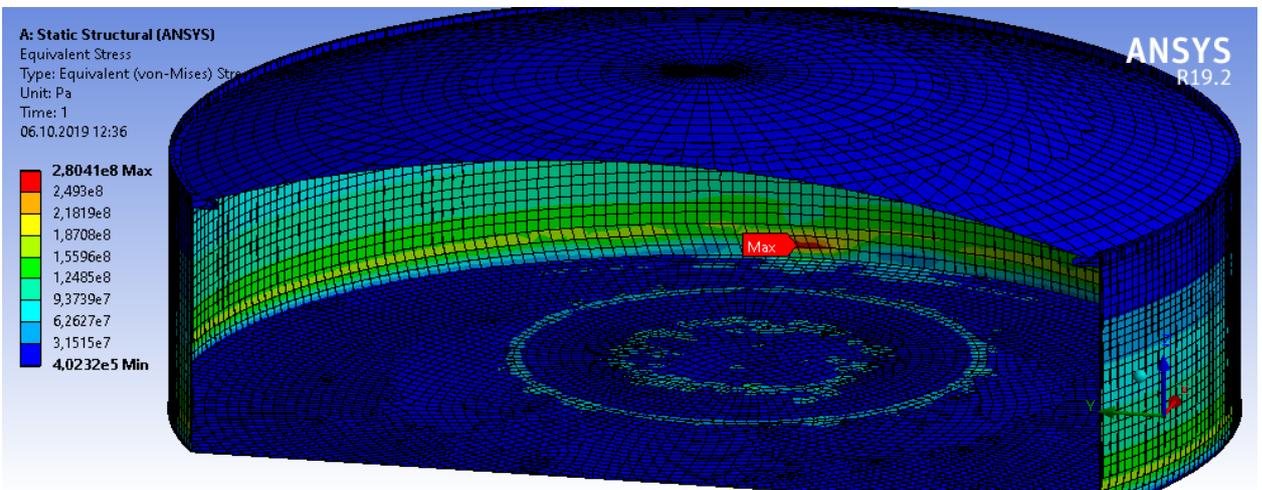


Рисунок 3.18 - Максимальные эквивалентные напряжения в стенке резервуара при $\delta = 9$ мм, $r = 10$ м, $X = r + 4$ м

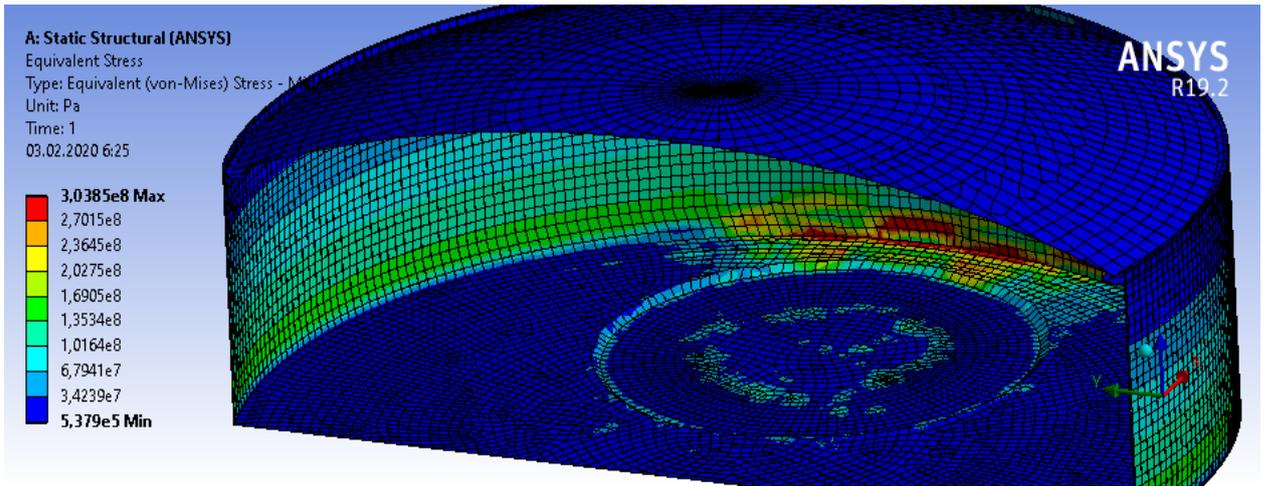


Рисунок 3.19 - Максимальные эквивалентные напряжения в стенке резервуара при $\delta = 9$ мм, $r = 10$ м, $X = r + 2$ м

Анализ полученных зависимостей показал, что при определенном расположении области неоднородности наступает момент, при котором максимальные эквивалентные напряжения в стенке резервуара начинают увеличиваться. Увеличение напряжений в стенке объясняется появлением краевого эффекта от цилиндрической оболочки РВС. Для каждого радиального размера локальной неоднородности грунтового основания построен отсекающий отрезок, характеризующий границу зоны действия краевого эффекта от стенки РВС при

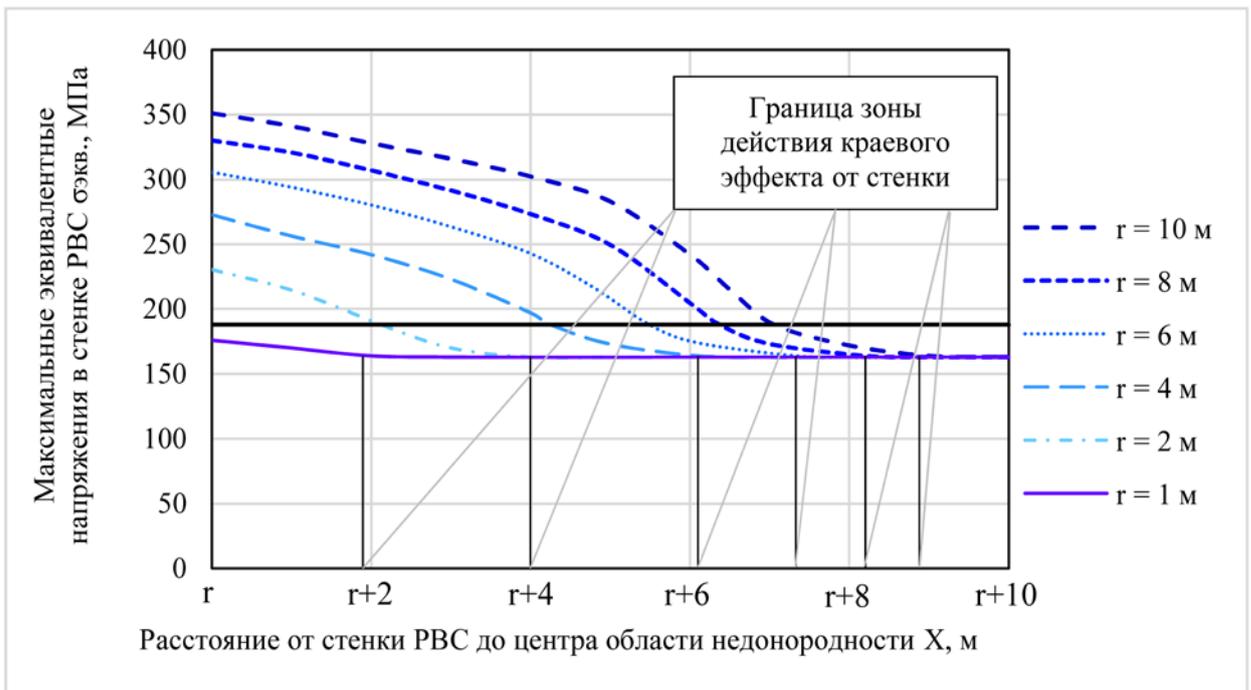


Рисунок 3.20 - Зависимости максимальных эквивалентных напряжений в стенке РВС-20000 от положения области неоднородности ($\delta = 6$ мм)

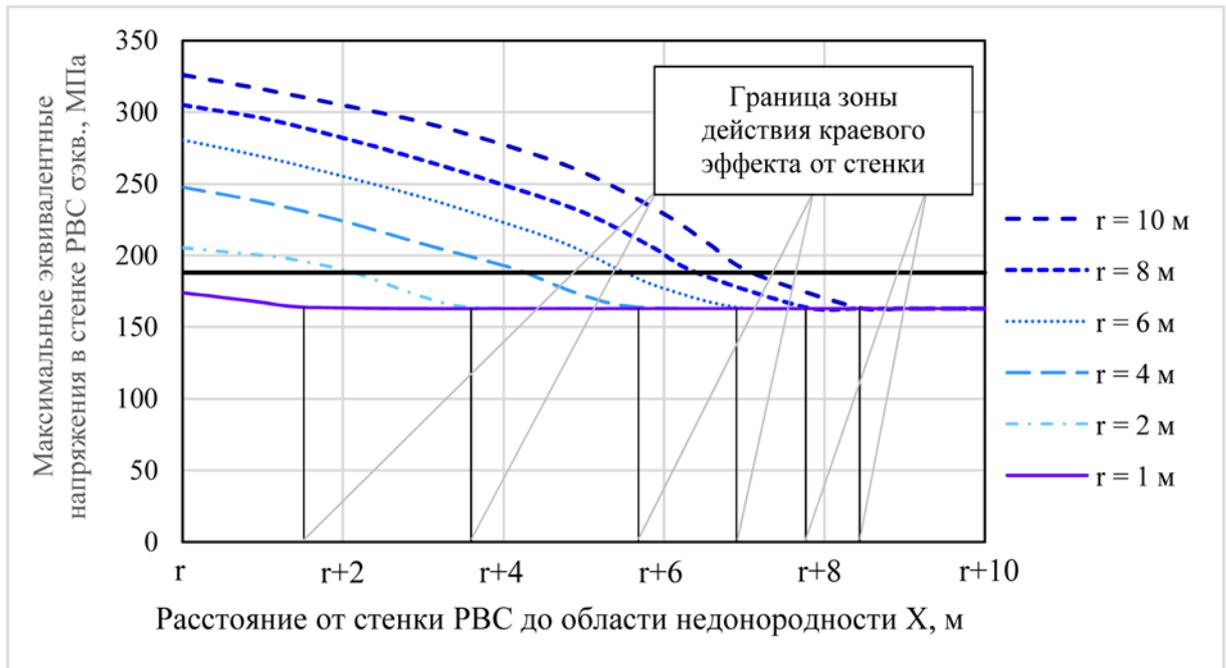


Рисунок 3.21 - Зависимости максимальных эквивалентных напряжений в стенке РВС-20000 от положения области неоднородности ($\delta = 9$ мм)

максимально допустимой величине осадки. Так, по результатам обработки полученных данных была установлена зависимость границы зоны действия краевого эффекта от радиуса области неоднородности для случаев толщины полотна днища 6 и 9 мм (рисунок 3.22, 3.23). Сравнительный анализ результатов расчетов показал, что при толщине полотна днища $\delta = 9$ мм зона влияния краевого эффекта от стенки уменьшается.

Также была установлена зависимость, позволяющая определить минимальное расстояние от стенки до центра области неоднородности X , при котором в случае предельной величины осадки максимальные действующие напряжения в стенке не превысят допустимые, для днищ толщиной 6 и 9 мм соответственно:

$$X = 3,0399 \cdot \ln(r) + r \quad (3.2)$$

$$X = 3,0086 \cdot \ln(r) + r \quad (3.3)$$

В случае расположения центра локальной неоднородности на расстоянии от стенки меньшем, чем определяемое по (3.2) и (3.3), при максимальной допустимой осадке в стенке возникают напряжения, превышающие допустимые согласно НТД $[\sigma] = 188$ МПа.

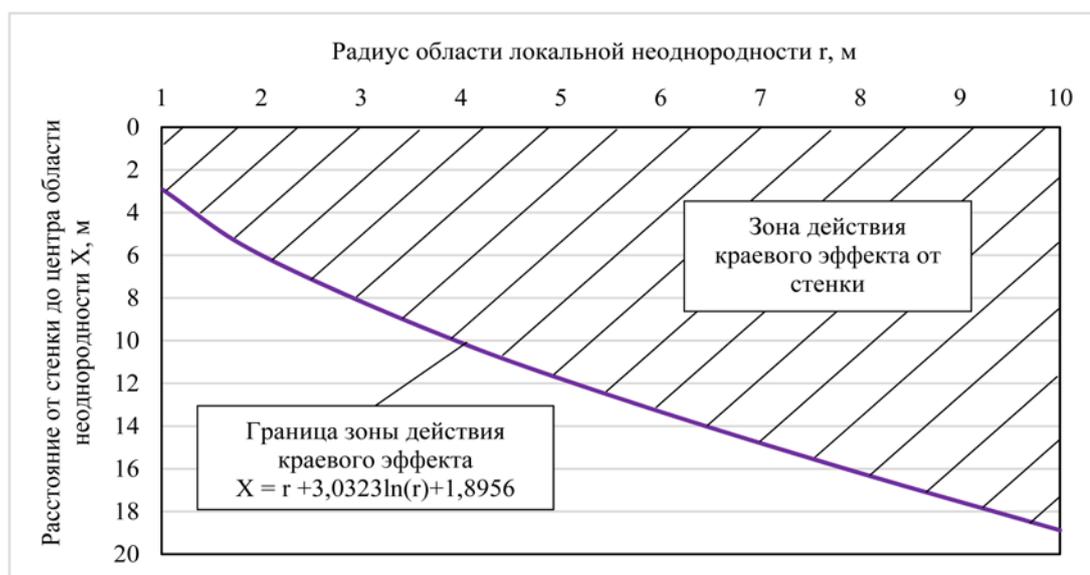


Рисунок 3.22 - Граница зоны действия краевого эффекта от стенки резервуара при толщине днища $\delta = 6$ мм



Рисунок 3.23 - Граница зоны действия краевого эффекта от стенки резервуара при толщине днища $\delta = 9$ мм

Так, с целью определения допустимых значений осадки при расположении области неоднородности в зоне краевого эффекта, для заданных радиусов области неоднородности были получены зависимости максимальных действующих напряжений в стенке от величины осадки и расстояния X от стенки до центра просадочной зоны. Расчеты выполнены для случаев толщины днища 6 и 9 мм.

На рисунках 3.24 – 3.35 представлены графические зависимости максимальных напряжений, действующих в стенке, от величины осадки,

построенные по результатам численного расчета. Для каждой кривой, соответствующей расстоянию от стенки до центра области неоднородности построен отрезок, ограничивающий предельную величину осадки при максимальных эксплуатационных нагрузках. Установлено, что при предельных значениях осадки, определяемых согласно (1.6) и (3.1), в случае радиального размера области неоднородности $r = 1$ м максимальные напряжения в стенке не превышают допускаемые по НТД ($[\sigma] = 188$ МПа) даже в случае минимального расстояния от стенки до центра просадочной зоны ($X = r$), как при толщине днища 6 мм, так и 9 мм.

При остальных значениях радиуса локальной неоднородности, в случае расстояния $X = r$, при максимально допустимой величине осадки в стенке РВС-20000 возникает предельное состояние. Так, если расстояние от стенки до центра области неоднородности минимально, то в случае $r = 10$ м при предельной осадке днища толщиной 6 мм в стенке возникают напряжения 351 МПа, а при величине осадки 27 мм максимальные действующие напряжения равны 188 МПа.

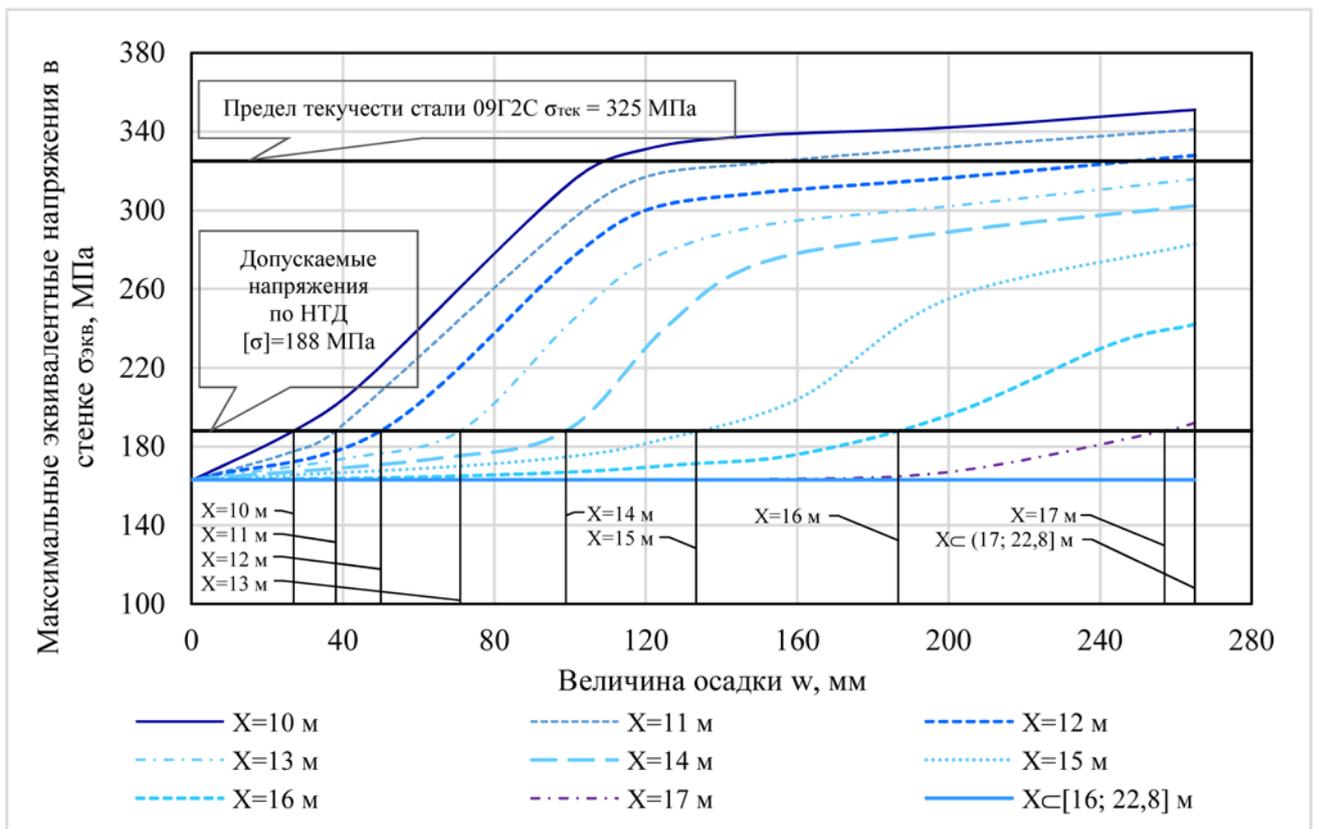


Рисунок 3.24 - Зависимости максимальных эквивалентных напряжений в стенке от величины осадки при $r = 10$ м, $\delta = 6$ мм

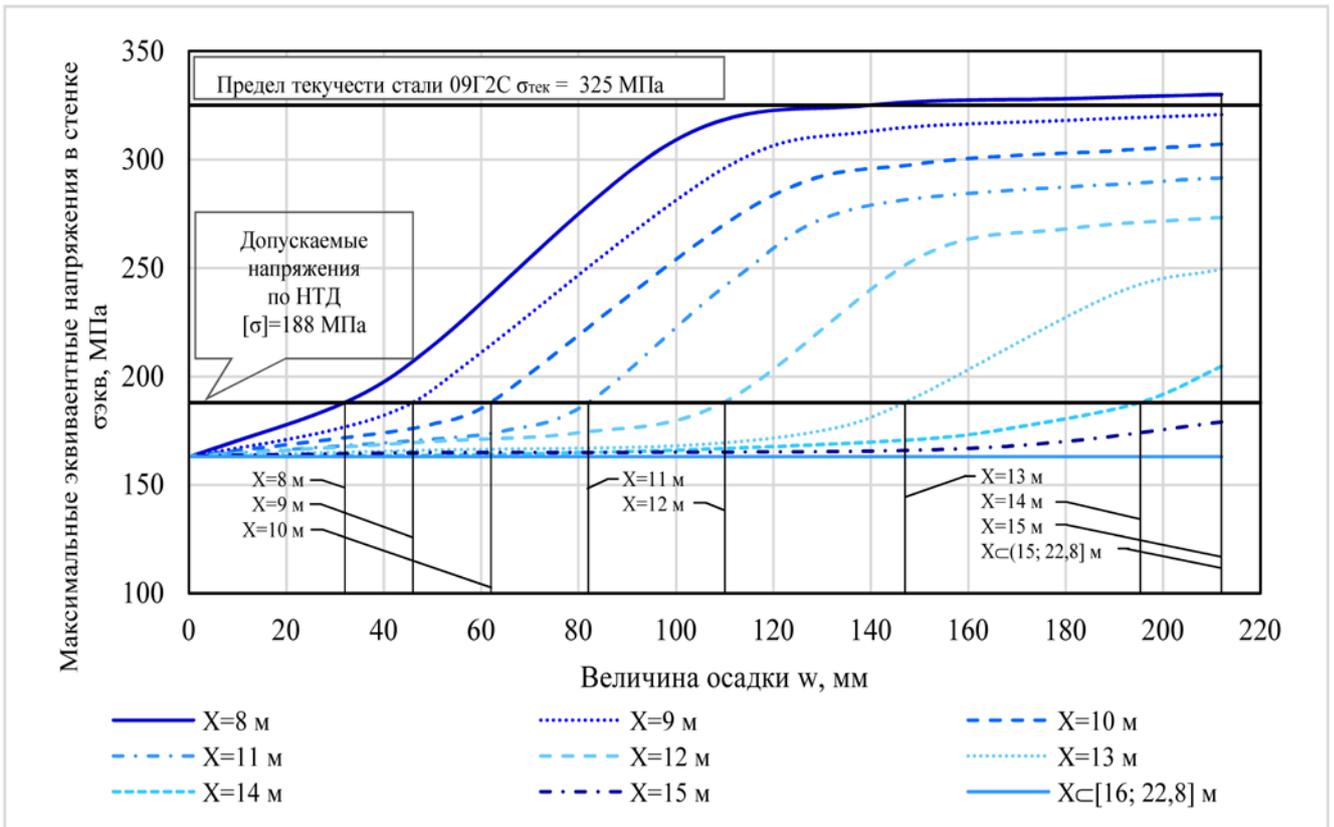


Рисунок 3.25 - Зависимости максимальных эквивалентных напряжений в стенке от величины осадки при $r = 8$ м, $\delta = 6$ мм

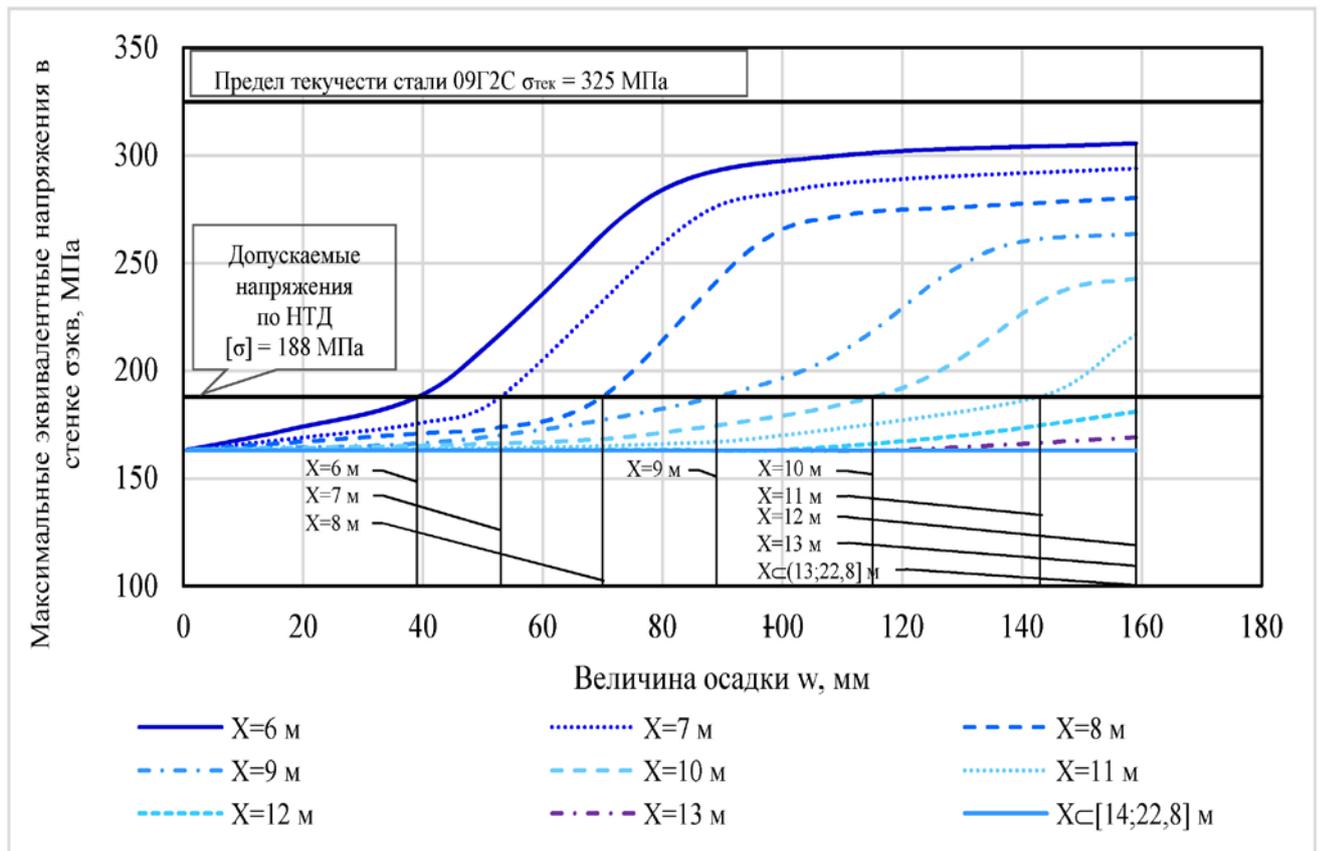


Рисунок 3.26 - Зависимости максимальных эквивалентных напряжений в стенке от величины осадки при $r = 6$ м, $\delta = 6$ мм

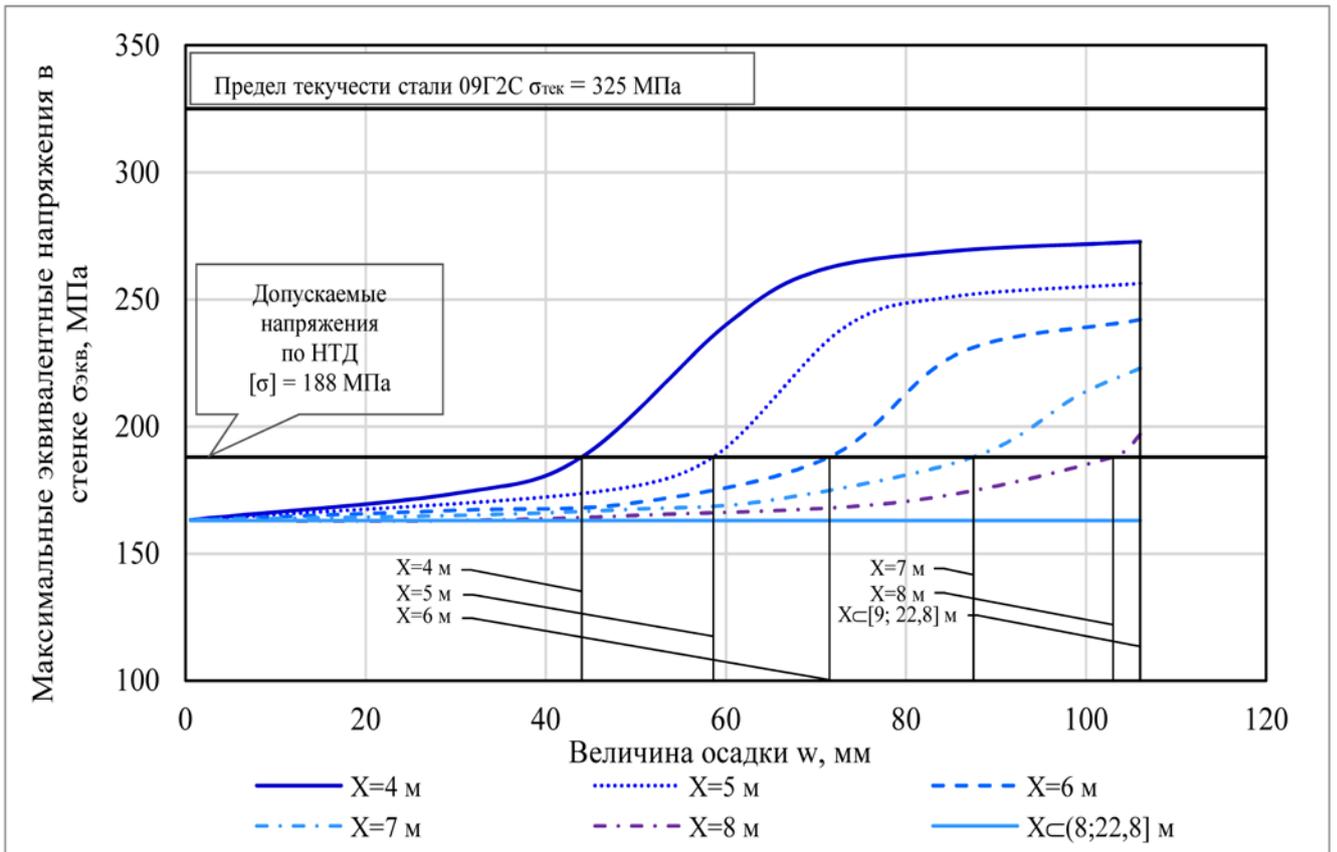


Рисунок 3.27 - Зависимости максимальных эквивалентных напряжений в стенке от величины осадки при $r = 4$ м, $\delta = 6$ мм

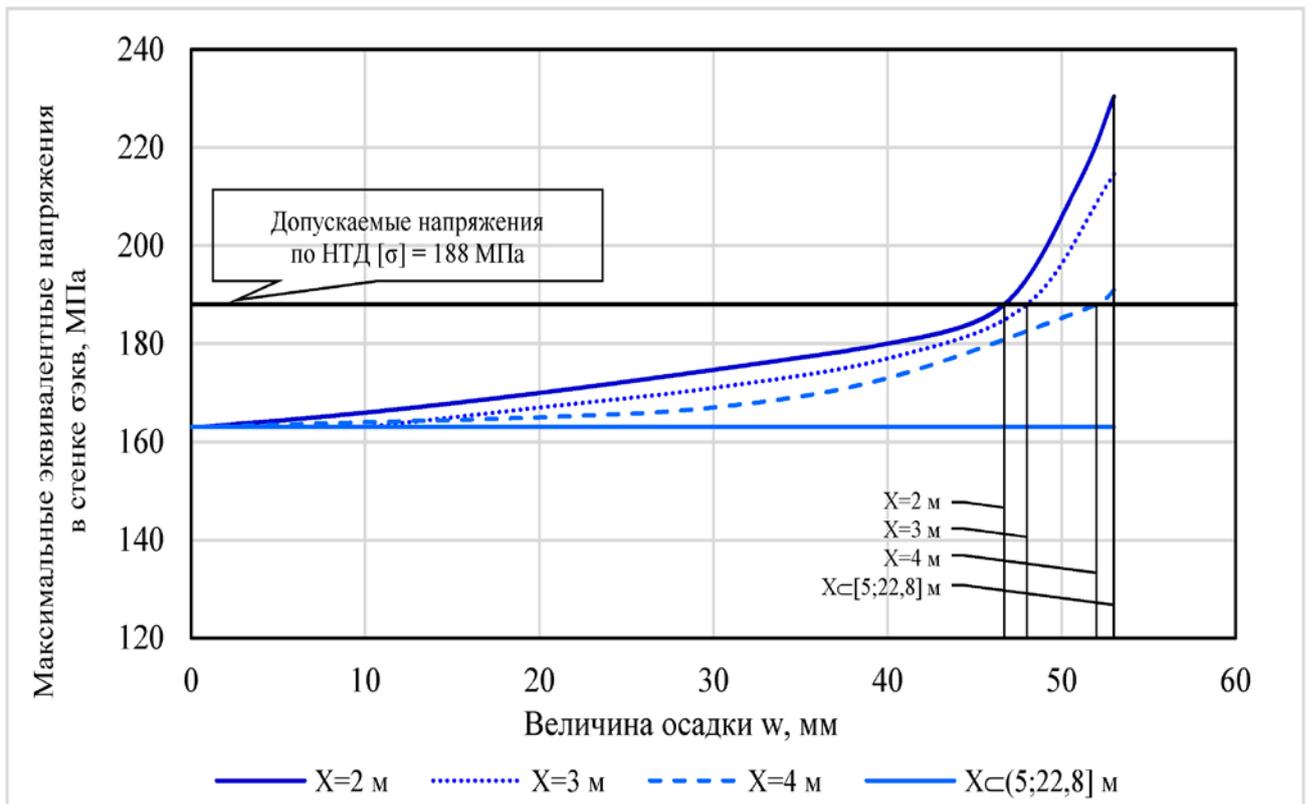


Рисунок 3.28 - Зависимости максимальных эквивалентных напряжений в стенке от величины осадки при $r = 2$ м, $\delta = 6$ мм

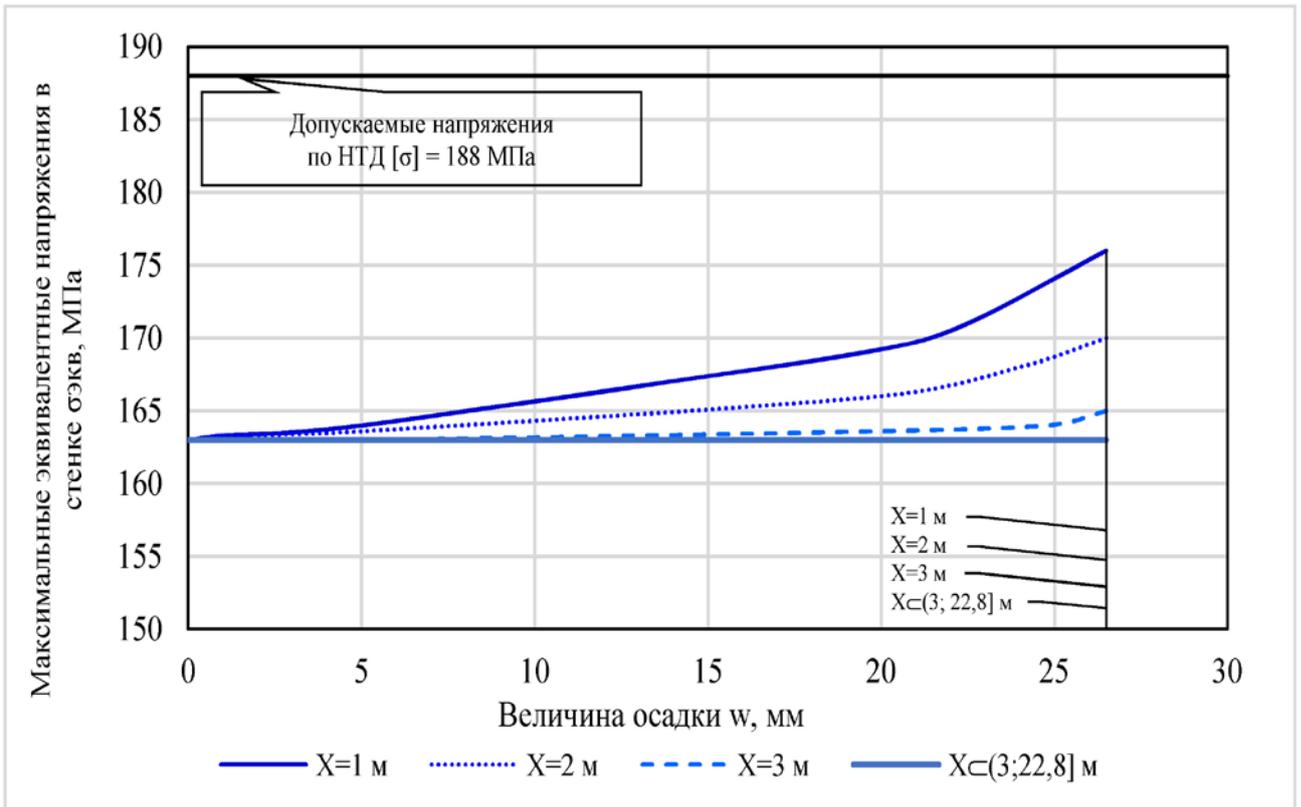


Рисунок 3.29 - Зависимости максимальных эквивалентных напряжений в стенке от величины осадки при $r = 1$ м, $\delta = 6$ мм

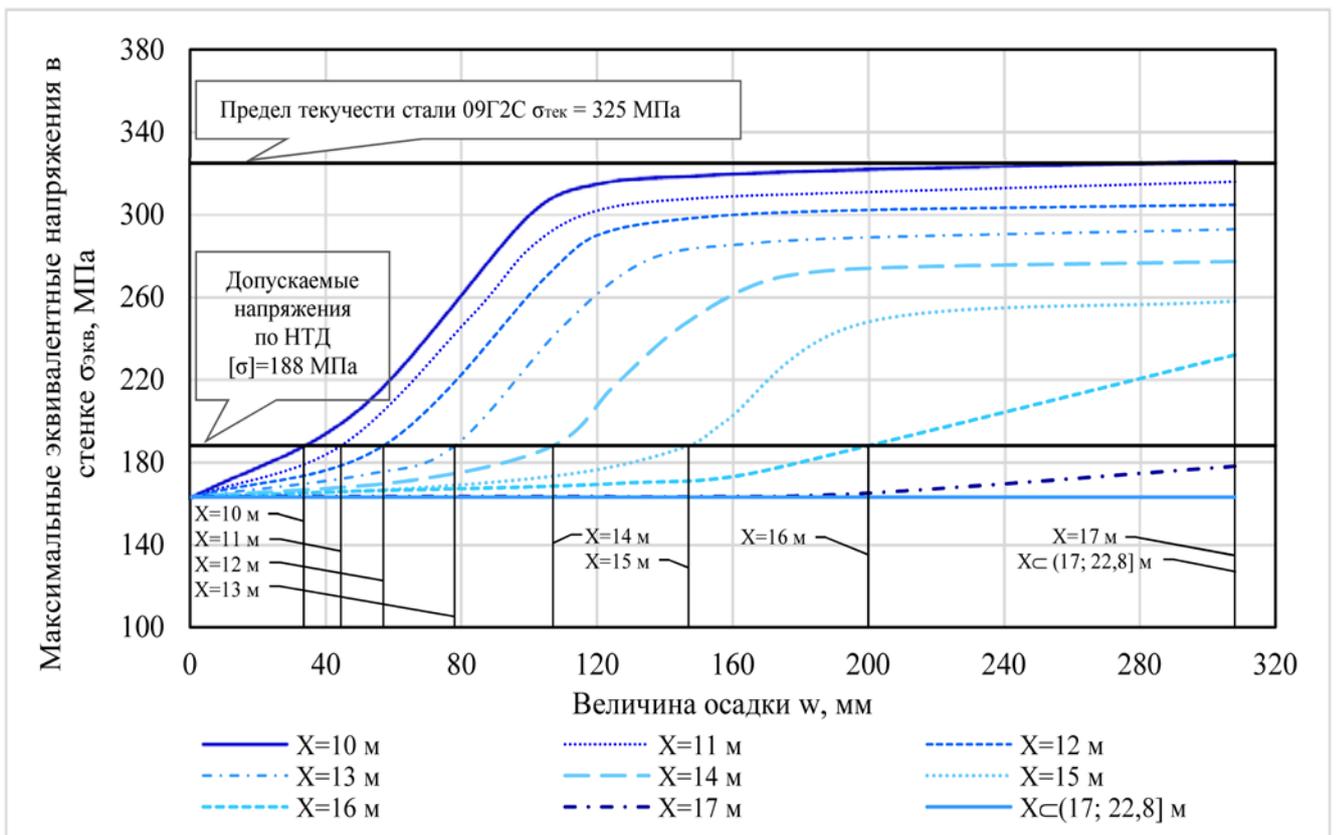


Рисунок 3.30 - Зависимости максимальных эквивалентных напряжений в стенке от величины осадки при $r = 10$ м, $\delta = 9$ мм

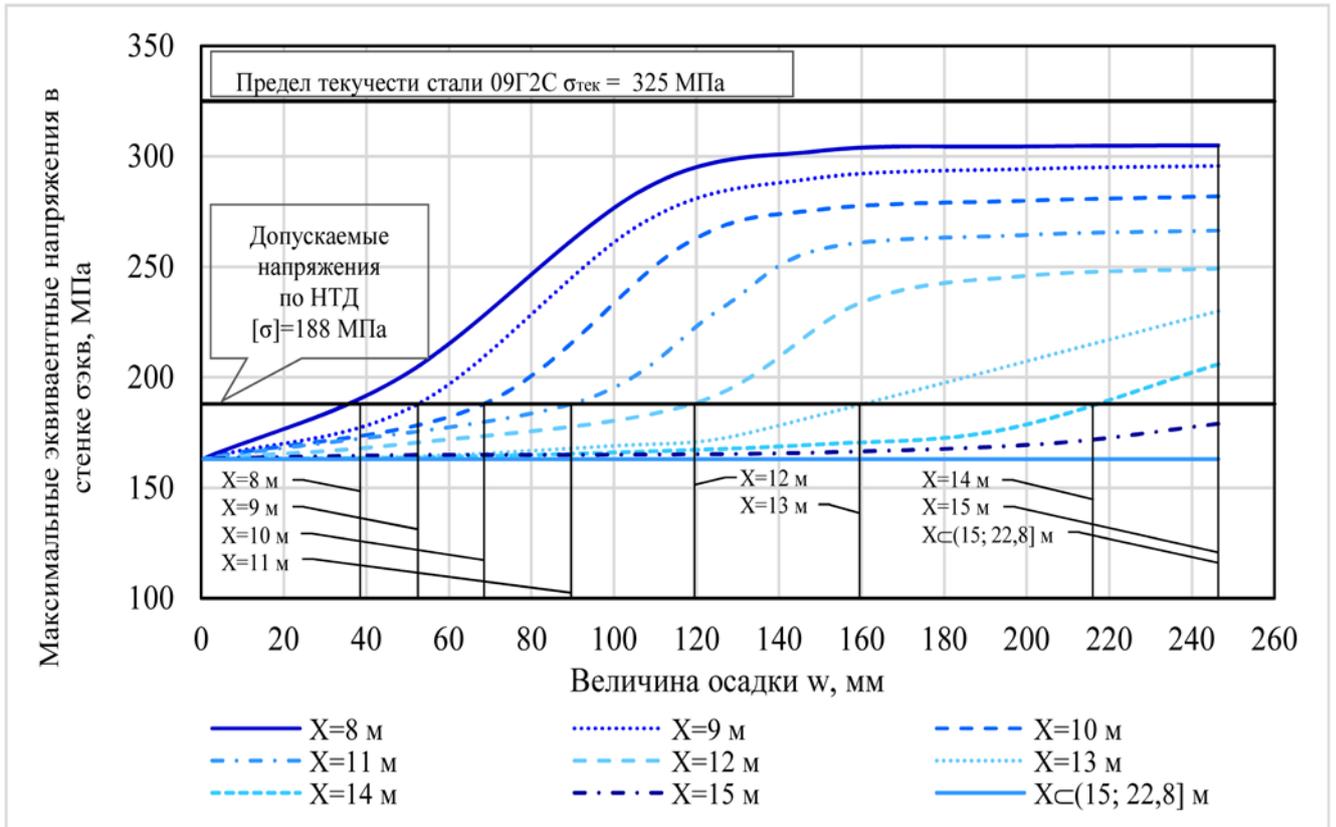


Рисунок 3.31 - Зависимости максимальных эквивалентных напряжений в стенке от величины осадки при $r = 8$ м, $\delta = 9$ мм

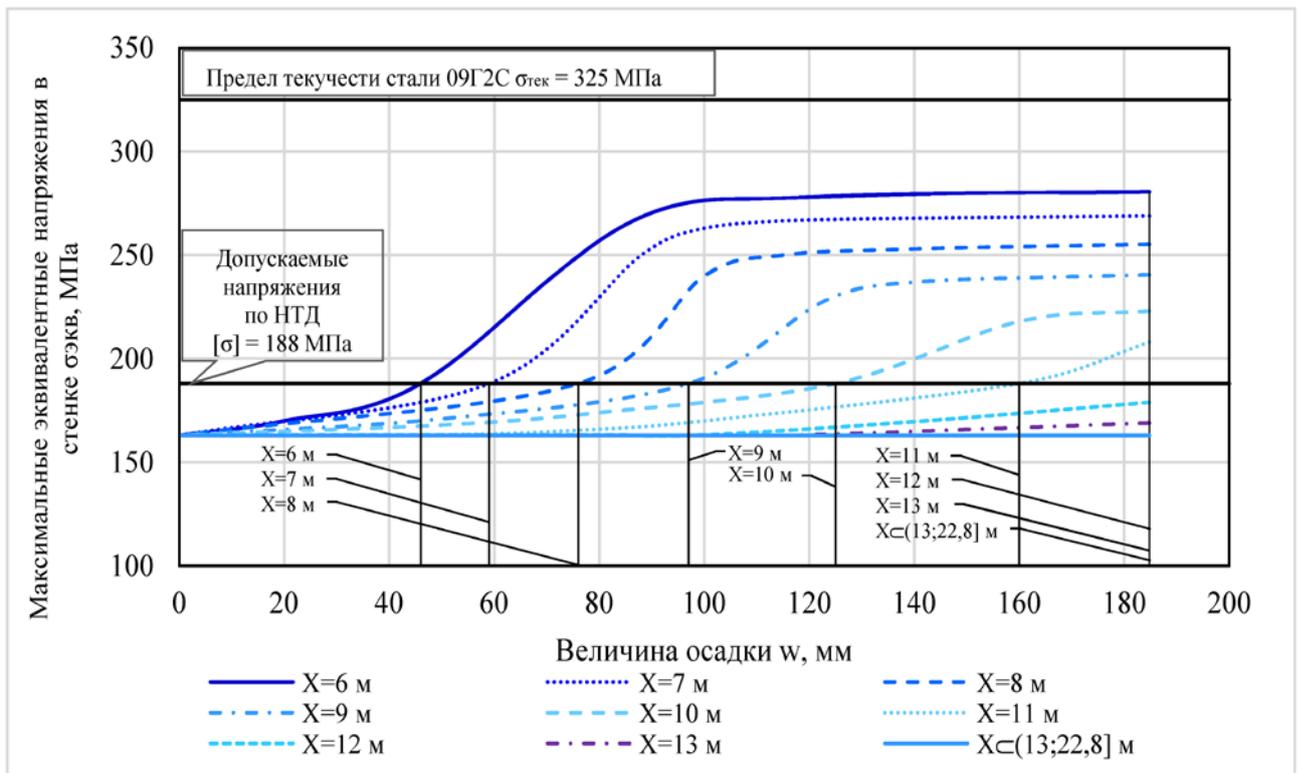


Рисунок 3.32 - Зависимости максимальных эквивалентных напряжений в стенке от величины осадки при $r = 6$ м, $\delta = 9$ мм

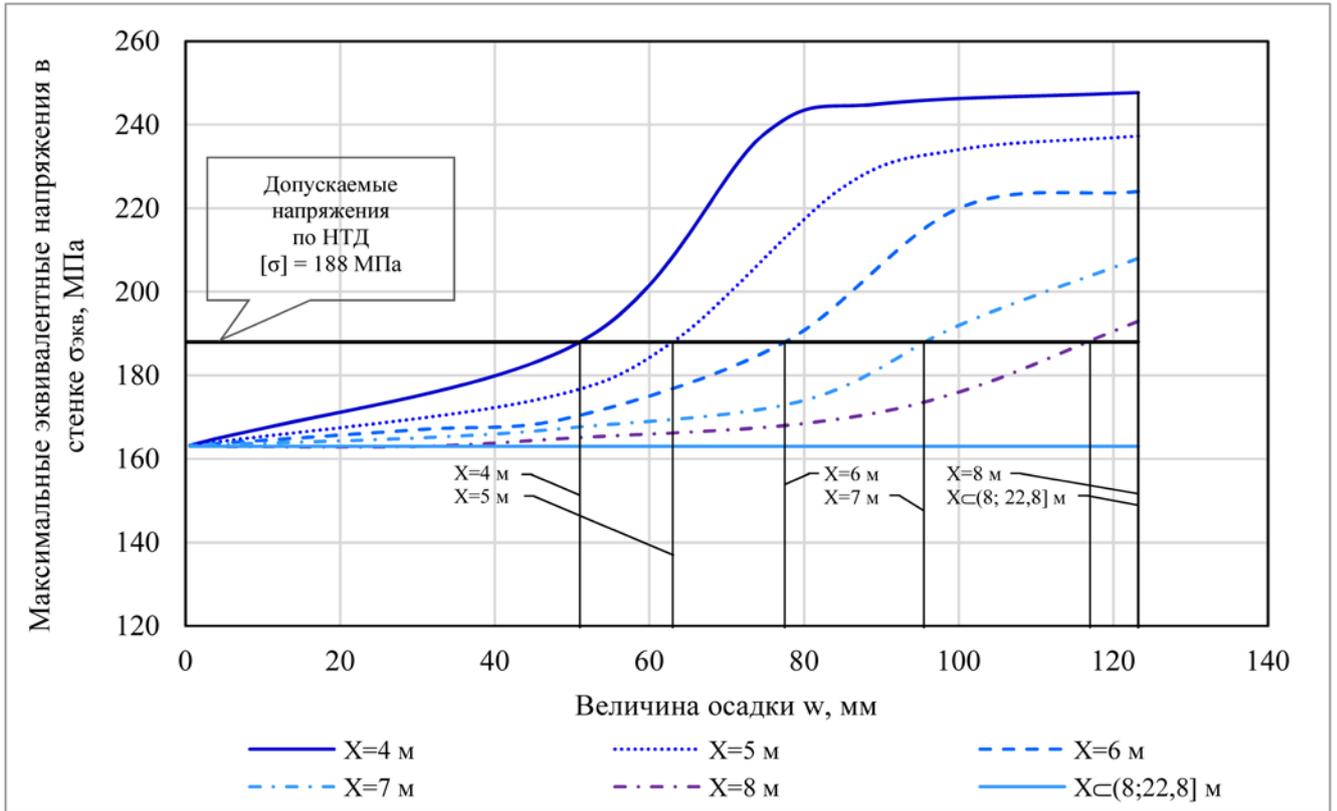


Рисунок 3.33 - Зависимости максимальных эквивалентных напряжений в стенке от величины осадки при $r = 4$ м, $\delta = 9$ мм

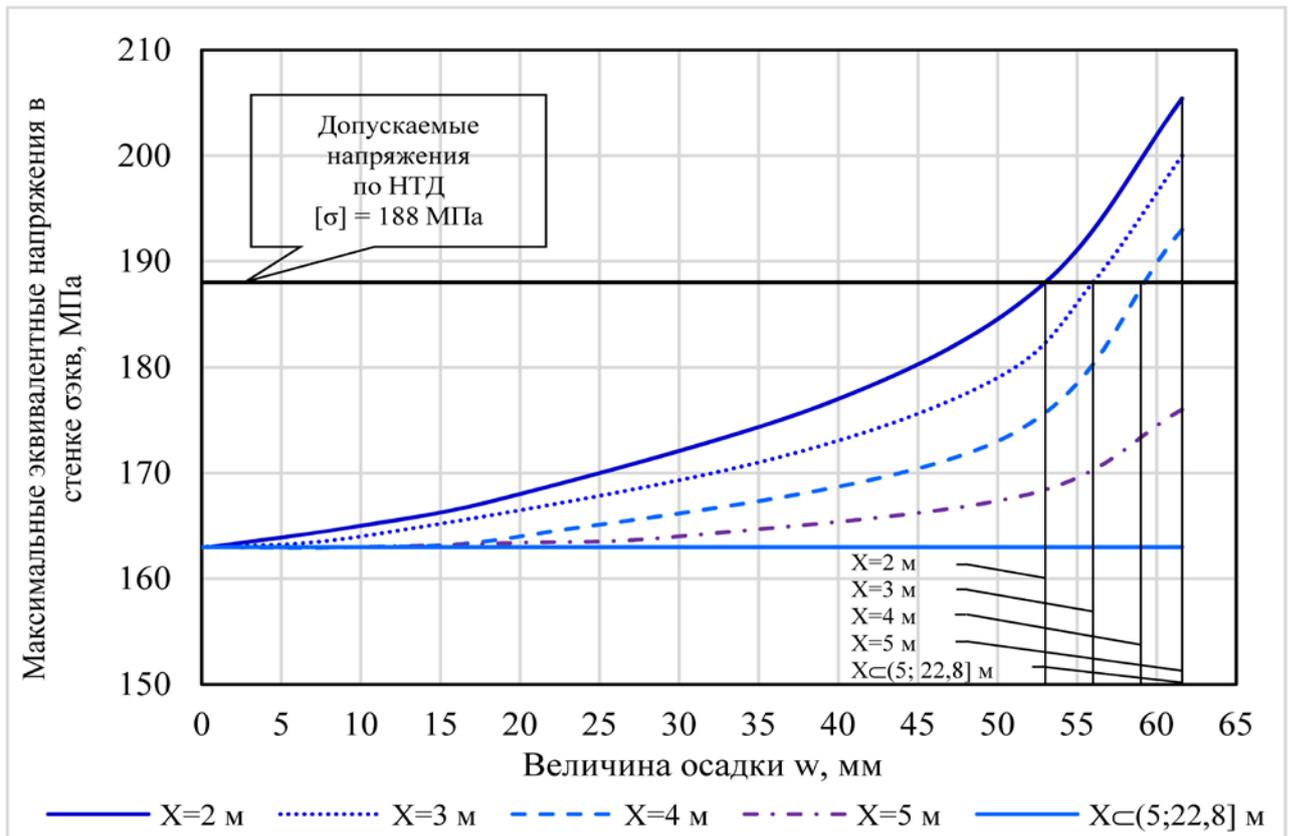


Рисунок 3.34 - Зависимости максимальных эквивалентных напряжений в стенке от величины осадки при $r = 2$ м, $\delta = 9$ мм

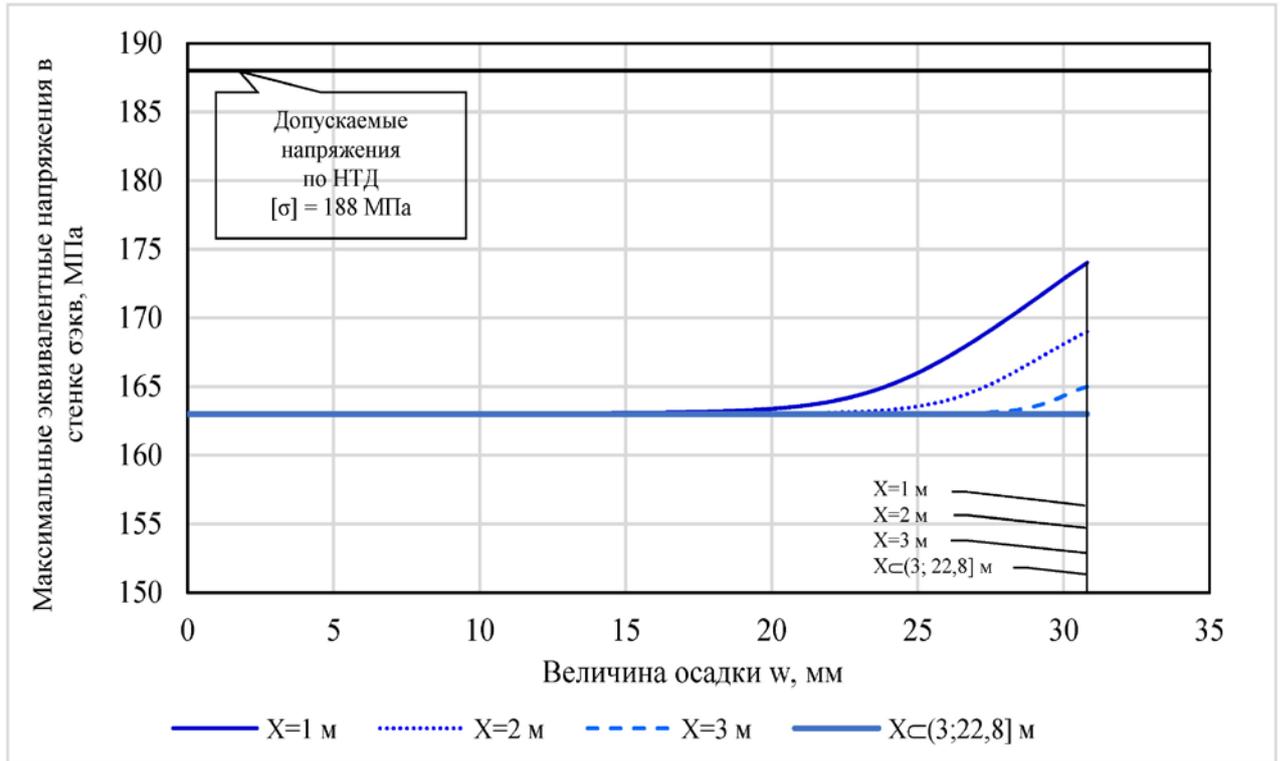


Рисунок 3.35 - Зависимости максимальных эквивалентных напряжений в стенке от величины осадки при $r = 1$ м, $\delta = 9$ мм

Из полученных зависимостей для каждого радиуса области неоднородности были установлены предельные значения осадки при различных расстояниях от стенки до центра просадочной зоны. На основании полученных данных были построены графические зависимости между максимально допустимой величиной осадки и расстоянием X от стенки для днищ толщиной 6 мм (рисунок 3.36) и 9 мм (рисунок 3.37).

При обработке результатов вычислений было получено выражение, аппроксимирующее установленные зависимости осадки от расстояния X и радиального размера области неоднородности:

$$w \leq m e^{a(X-r)} \quad (3.4)$$

где m и a – коэффициенты, зависящие от радиуса области неоднородности и определяются согласно формулам:

- при толщине полотна днища $\delta = 6$ мм:

$$m = 0,0655r^3 - 1,4373r^2 + 6,732r + 37,952 \quad (3.5)$$

$$a = 0,0008r^3 - 0,0187r^2 + 0,1577r - 0,1835 \quad (3.6)$$

- при толщине полотноца днища $\delta = 9$ мм:

$$m = 0,0825r^3 - 1,6584r^2 + 6,965r + 38,003 \quad (3.7)$$

$$a = 0,0010r^3 - 0,0213r^2 + 0,1695r - 0,194 \quad (3.8)$$

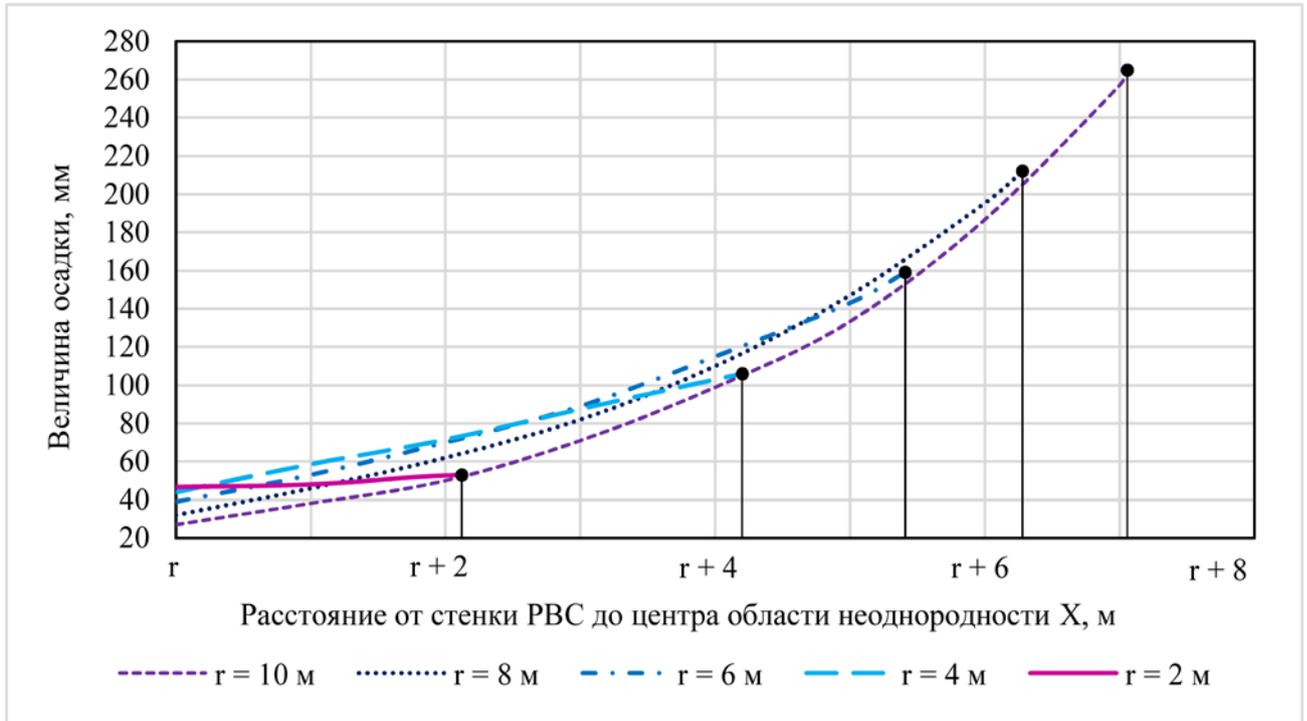


Рисунок 3.36 - Зависимость величины осадки от расстояния от стенки до центра области неоднородности при $\delta = 6$ мм

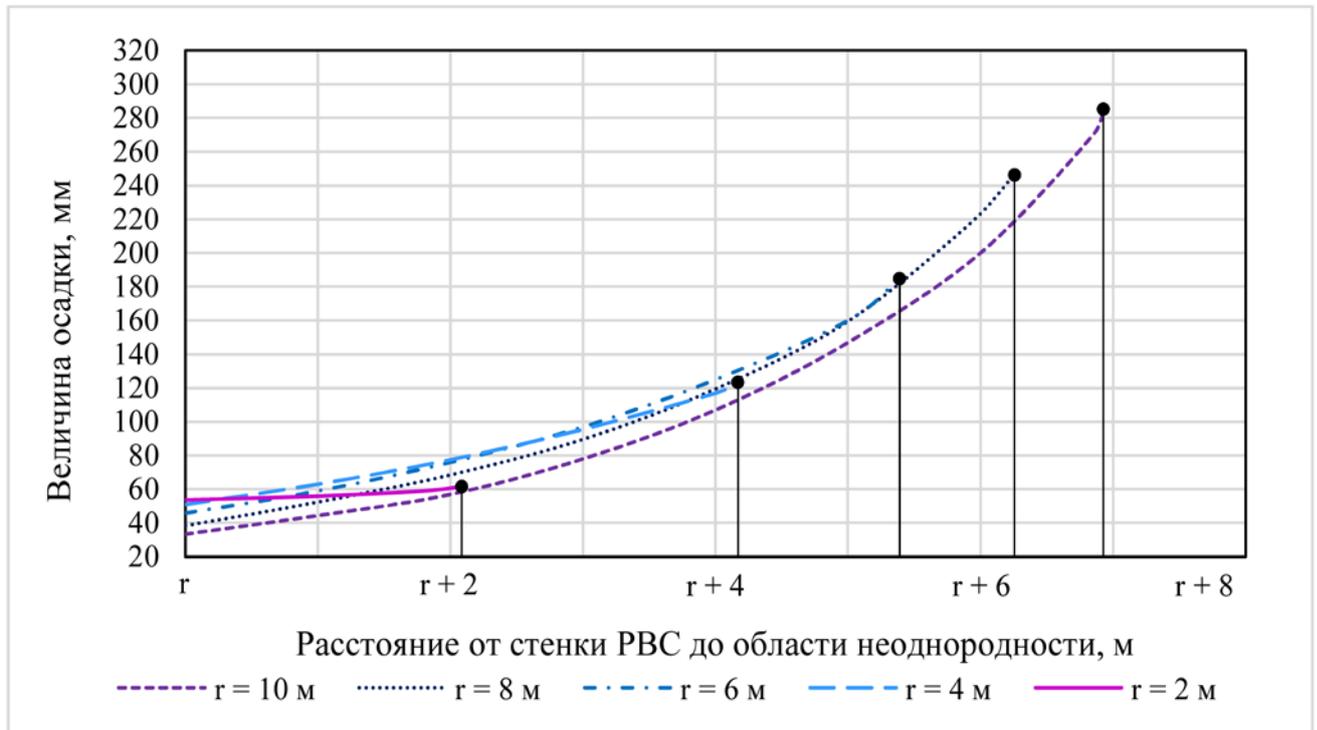


Рисунок 3.37 - Зависимость величины осадки от расстояния от стенки до центра области неоднородности при $\delta = 9$ мм

Выполненные расчеты позволили сформулировать предложения по внесению изменений в действующую НТД РФ в части назначения величины локальной осадки РВС-20000 при неоднородности в грунтовом основании. Установленные в ходе вычислений зависимости легли в основу методики оценки НДС резервуара РВС-20000 при локальной неоднородности грунтового основания.

Выводы по главе

1. Разработана расчетная схема и решена контактная задача взаимодействия резервуара РВС-20000 с грунтовым основанием на основе модели Пастернака, учитывающая деформацию грунта за пределами области неоднородности.

2. Определены максимально допустимые величины осадки днища РВС-20000 толщиной 6 и 9 мм для различных радиальных размеров локальной неоднородности, изменяющихся в пределах от 1 до 10 м, значения которых укладываются 92% случаев, встречающихся на практике величин локальных осадок днища резервуара РВС-20000, при максимальных эксплуатационных нагрузках без учета краевого эффекта от стенки РВС.

3. Установлена степень детализации модели резервуара, позволяющая определить значения параметров напряженно-деформированного состояния металлоконструкций РВС-20000 при неравномерной осадке основания с достаточной точностью.

4. Получены зависимости между параметрами области неоднородности и напряжениями в стенке, позволяющие определять границы зоны действия краевого эффекта для полотнищ днищ отечественных типоразмеров. Для днища толщиной 6 и 9 мм установлены выражения, определяющие максимально допустимую величину осадки в зависимости от геометрических размеров и расположения области неоднородности относительно стенки РВС.

ГЛАВА 4. МЕТОДИКА ОЦЕНКИ НДС РЕЗЕРВУАРА РВС-20000 ПРИ ЛОКАЛЬНОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ ГРУНТОВОГО ОСНОВАНИЯ

Вертикальные стальные резервуары являются одними из основных объектов цепочки магистрального транспорта нефти и относятся к сооружениям повышенной опасности. Обеспечение условий надежной эксплуатации резервуаров имеет важное значение, так как аварии РВС приводят к тяжелым экологическим, экономическим и социальным последствиям. Так, оценка технического состояния РВС и своевременное проведение ремонтных работ является одним из условий безопасной эксплуатации данных сооружений.

Техническое состояние резервуаров принято оценивать на основании параметров их напряженно-деформированного состояния. В работах [14, 21, 62, 75, 78] убедительно доказано, что неравномерная осадка оснований, оказывает значительное влияние на формирование уровня НДС резервуаров и является одной из главных причин аварий РВС.

Перемещение районов строительства резервуарных парков на территории со слабонесущими, водонасыщенными и многолетнемерзлыми грунтами привело к увеличению случаев аварий резервуаров, вызванных неравномерными осадками оснований. Несмотря на сооружение фундаментов и качественную подготовку искусственных оснований под вертикальные стальные резервуары неоднородность грунтов естественного основания приводит к неравномерным осадкам, существенно влияющим на напряженно-деформированное состояние резервуарных конструкций. Появление области неоднородности в грунтовом основании резервуара может быть связано с изменением инженерно-геологических условий площадки объекта, а также с изменением условий консолидации оснований при больших габаритных размерах РВС. Необходимо отметить, что высокие темпы добычи нефти стали одной из причин увеличения геометрических размеров резервуаров, в том числе диаметральных размеров конструкций. Как следствие, увеличилась вероятность возникновения неравномерных осадок, вызванных появлением или наличием локальной области неоднородности в

естественном основании РВС.

Конструкция резервуара и его основания прежде всего должны обеспечивать безопасную эксплуатацию РВС. Осадка оснований резервуаров, вызванная деформацией грунтов, является неминуемым явлением в практике эксплуатации РВС. Осадка развивается в процессе сжатия грунтов основания под действием гидростатической нагрузки и веса металлоконструкций РВС. Локальные просадки полотнища днища РВС приводят к развитию дополнительных деформаций металлоконструкций РВС и появлению дополнительных напряжений. Значительные эксплуатационные напряжения в совокупности с дополнительными, вызванными неравномерной осадкой, могут привести к разрушению металлоконструкций РВС. В процессе гидравлических испытаний и при эксплуатации резервуаров происходит осадка естественного грунтового основания и подготовленного искусственного основания, а также возникают локальные осадки на отдельных участках под днищем РВС. Осадка и её развитие во времени предопределяется характером залегания грунтов и их неоднородностью в пределах площади основания каждого резервуара; степенью обводнения грунтовыми водами и гидродинамическим режимом вод, качеством устройства искусственного уплотненного основания и другими факторами. Для обеспечения требуемой эксплуатационной надежности необходимо знать характер изменения НДС конструкций РВС при развитии осадки основания.

Исследованию напряженно-деформированного состояния резервуаров при неравномерных осадках оснований, посвящены работы [17, 43, 44, 72, 76, 88]. Однако полученные результаты не позволяют оценить НДС резервуара при неравномерной осадке основания с достаточной точностью либо позволяют решить отдельные локальные задачи, не давая картину изменения НДС в целом. Результаты исследований зарубежных ученых и требования западных стандартов не могут быть использованы для оценки НДС резервуаров отечественных типоразмеров при неравномерных осадках из-за существенных отличий в конструкциях и используемых материалах. При этом в работах [76, 88] отмечено,

что существует необходимость гармонизации российских нормативно-технических документов с зарубежными стандартами в области резервуаростроения.

Согласно действующей НТД [19] надежность вертикальных стальных резервуаров обеспечивается за счет: расчета конструкции РВС по предельным состояниям первой и второй группы; выбора оптимальных конструктивных решений и материалов качественного выполнения строительно-монтажных работ; создания условий, обеспечивающих безопасную эксплуатацию; своевременного контроля технического состояния сооружения; проведения мероприятий, нацеленных на снижение вероятности возникновения аварийных ситуаций.

К первой группе предельных состояний относится потеря несущей способности в результате:

- потери устойчивости;
- частичного или полного разрушения различного характера;
- обстоятельств, требующих прерывания эксплуатации резервуара: недопустимо большие деформации, нарушение целостности сварных соединений, раскрытие трещин.

Ко второй группе предельных состояний относится исчерпание ресурса долговечности, нарушение условий нормальной эксплуатации в результате:

- достижения максимально допустимых величин деформаций металлоконструкций РВС и основания сооружения;
- достижения максимально допустимой ширины раскрытия трещины;
- обстоятельств, требующих ограничения эксплуатации РВС во времени из-за нарушения нормальной работы технологического оборудования, снижения срока службы РВС.

При проектировании РВС расчет по предельным состояниям выполняется с учетом:

- прочностных и деформационных характеристик грунтов и материалов, определяемых по результатам инженерно-геологических изысканий и

техническому заданию соответственно;

- расчетных значений нагрузок и воздействий;
- геометрических размеров конструкции РВС (в том числе с учетом отклонений);
- коэффициентов надежности и предельных значений усилий;
- негативных последствий при достижении конструкции РВС предельных состояний;
- расчетного срока службы РВС.

Обеспечение надежности конструкции РВС заключается в выполнении условия – расчетные значения напряжений и деформаций не должны превышать соответствующие им максимально допустимые значения, установленные в соответствии с нормативно-технической документацией.

Одним из факторов, влекущим наступление предельного состояния в металлоконструкциях РВС, является локальная осадка полотнища днища. Своевременная и достоверная оценка НДС резервуара при локальных просадках центральной части днища позволит избежать возникновения аварийных ситуаций РВС, а также сократить материальные издержки эксплуатирующих предприятий за счет переноса сроков ремонтных работ.

4.1 Алгоритм оценки НДС резервуара РВС-20000 при локальной неоднородности грунтового основания

В результате численного исследования изменения напряженно-деформированного состояния резервуара РВС-20000 при неравномерной осадке, вызванной локальной неоднородностью грунтового основания, установлено, что положение области неоднородности в окрестностях стенки РВС существенно влияет на уровень НДС металлоконструкций резервуара. На основании зависимостей напряжений, возникающих в металлоконструкциях резервуара РВС-20000, от геометрических характеристик локальной неоднородности основания была разработана методика, позволяющая проектным и эксплуатирующим

предприятиям определять НДС резервуара РВС-20000 при локальной осадке основания. Исходные данные, требуемые для оценки НДС резервуара:

— отчет по результатам полного технического обследования РВС-20000, включающий результаты нивелирования наружного контура днища и его полотнища;

— сертификаты, включающие сведения о механических характеристиках и химическом составе материала, использованного при строительстве РВС;

— отчет о проведении инженерно-геологических изысканий при проектировании РВС;

— отчеты по результатам предыдущих технических обследований резервуара;

— проектная документация на строительство, капитальный ремонт и реконструкцию резервуара;

— материалы, содержащие информацию о истории нагружения конструкции резервуара.

Согласно положениям, установленным в [51], при проведении полной технической диагностики РВС осуществляются следующие виды контроля: визуальный и измерительный, геодезический, ультразвуковой контроль основного металла и сварных швов, ультразвуковая толщинометрия, магнитопорошковый контроль, магнитный, акустико-эмиссионный, радиографический и капиллярный. Результаты технического обследования резервуара являются основанием для оценки технического состояния сооружения.

К геодезическому контролю относится нивелировка наружного контура днища и его полотнища. Величины отклонений днища от проектного положения определяются с применением гидравлических и оптических нивелиров, а также лазерных сканеров.

Для оценки НДС резервуара РВС-20000 при неравномерной осадке, вызванной локальной неоднородностью грунтового основания, разработан алгоритм, представленный на рисунке 4.1.

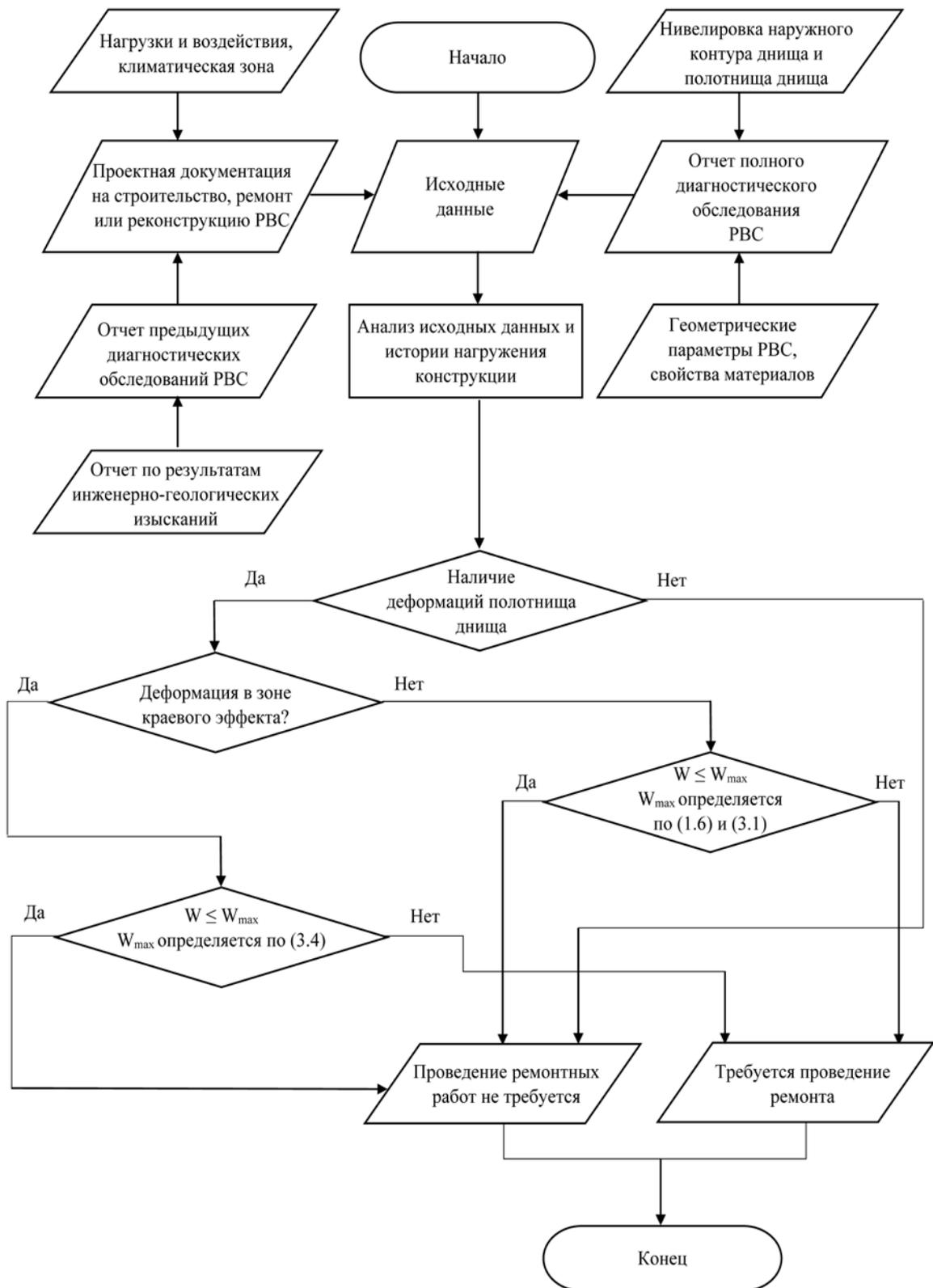


Рисунок 4.1 - Алгоритм оценки НДС резервуара РВС-20000 при локальной неоднородности грунтового основания

На основе анализа исходных данных определяются нагрузки и воздействия на конструкцию РВС, геометрические размеры металлоконструкций резервуара

РВС-20000, в том числе толщина листов полотнища днища. По результатам нивелирования полотнища днища резервуара определяется наличие деформаций листов центральной части днища. При наличии деформации днища РВС в виде локального прогиба определяется радиус окружности (r), вписанной в область деформации, и величина вертикальной составляющей осадки. Далее необходимо установить положение центра окружности, вписанной в деформированную зону, относительно стенки РВС. Для этого замеряется расстояние от стенки резервуара до центра искомой окружности – X .

Следующим этапом является проверка выполнения условий:

— для днищ толщиной 6 мм:

$$X \leq r + 3,0399 \cdot \ln(r) \quad (4.1)$$

— для днищ толщиной 9 мм:

$$X \leq r + 3,0086 \cdot \ln(r) \quad (4.2)$$

Если условия (4.1) и (4.2) выполняются, то центр окружности, вписанной в область локальной осадки, находится в зоне действия краевого эффекта от стенки. В данном случае необходимо обратиться к зависимостям, представленным на рисунках 4.2 и 4.3.

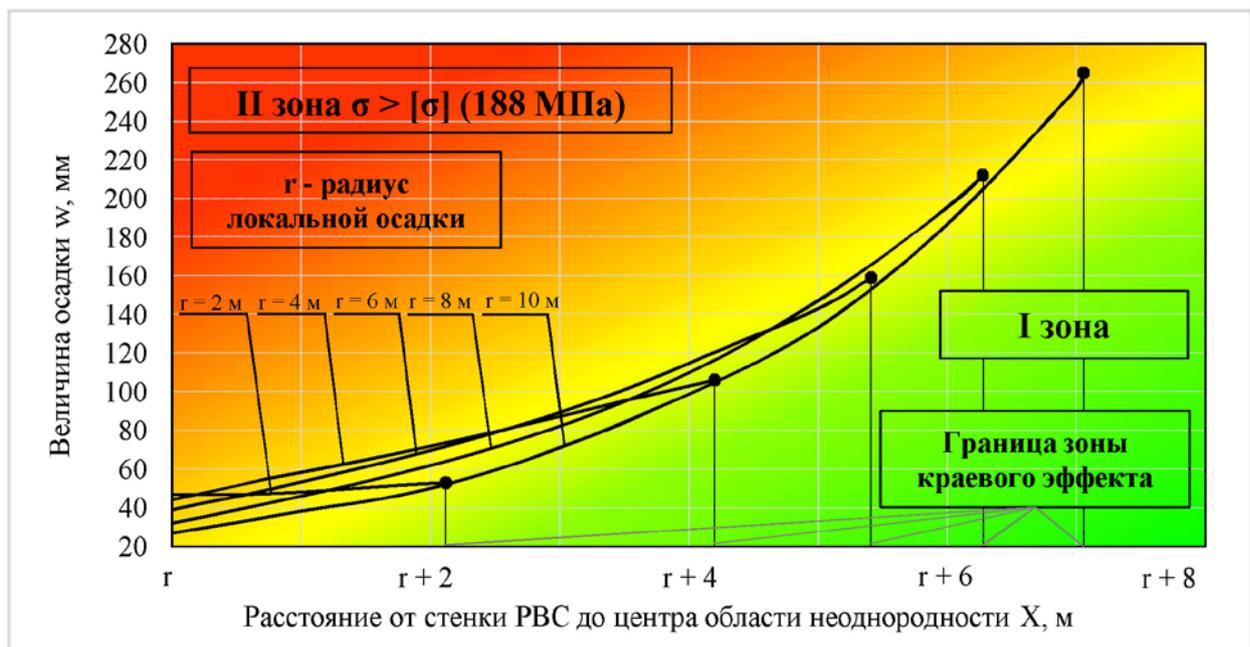


Рисунок 4.2 - Зоны опасности при расположении центра локальной осадки в зоне действия краевого эффекта при толщине полотнища днища 6 мм

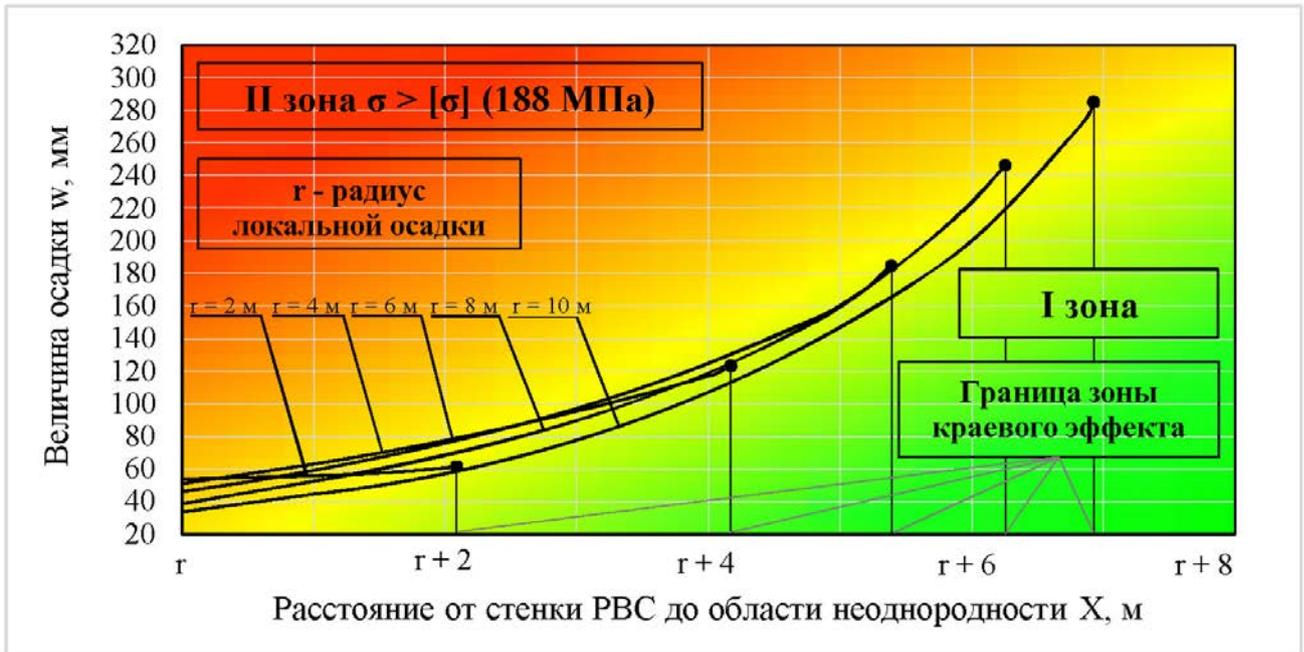


Рисунок 4.3 - Зоны опасности при расположении центра локальной осадки в зоне действия краевого эффекта при толщине полотна днища 9 мм

Графические зависимости, представленные на данных рисунках, позволяют определить зону наступления предельного состояния в стенке резервуара РВС-20000 при осадке, вызванной локальной неоднородностью грунтового основания. Так, в случае если точка пересечения прямой, соответствующей расстоянию от стенки до центра просадочной зоны, и величины осадки попадает во II зону, то в стенке возникают напряжения, превышающие допускаемые по НТД $[\sigma] = 188$ МПа. В данных условиях конструкция резервуара находится в аварийном состоянии и дальнейшая эксплуатация резервуара невозможна, требуется незамедлительно вывести резервуар из эксплуатации для проведения ремонта. Если точка пересечения находит в I зоне, в стенке резервуара РВС-20000 предельное состояние не возникнет, следовательно, проведение ремонтных работ не требуется.

При невыполнении условий (4.1), (4.2) оценка НДС резервуара РВС-20000 производится на основе графических зависимостей, представленных на рисунках 4.4 и 4.5. Если точка пересечения кривой, соответствующей радиусу просадочной зоны, и величины осадки находится в I зоне, то максимальные действующие напряжения в днище не превысят допускаемые $[\sigma] = 269$ МПа согласно НТД. В пределах данной зоны предельное состояние наступить не может.

При попадании точки пересечения « r » и « w » во II зону в полотнище днища РВС возникают напряжения, превышающие допусκαемые. В данном случае требуется проведение ремонтных работ во избежание разрыва полотнища днища РВС-20000.

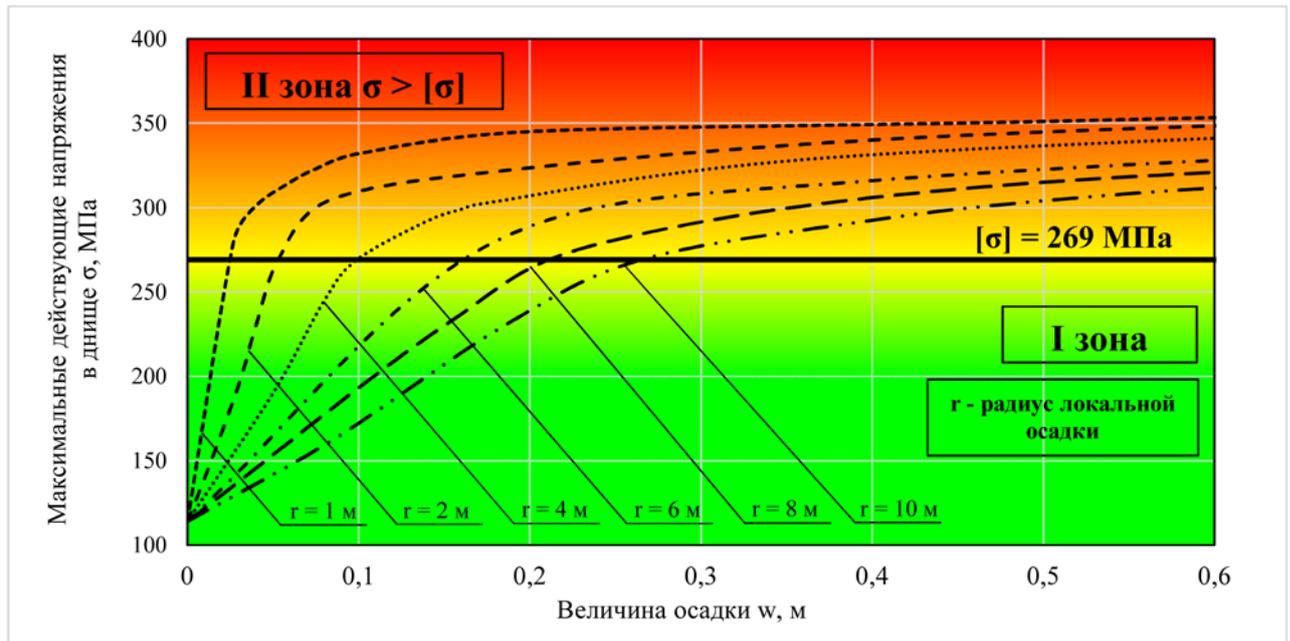


Рисунок 4.4 - Зоны опасности при расположении центра локальной осадки за пределами зоны краевого эффекта при толщине полотнища днища 6 мм

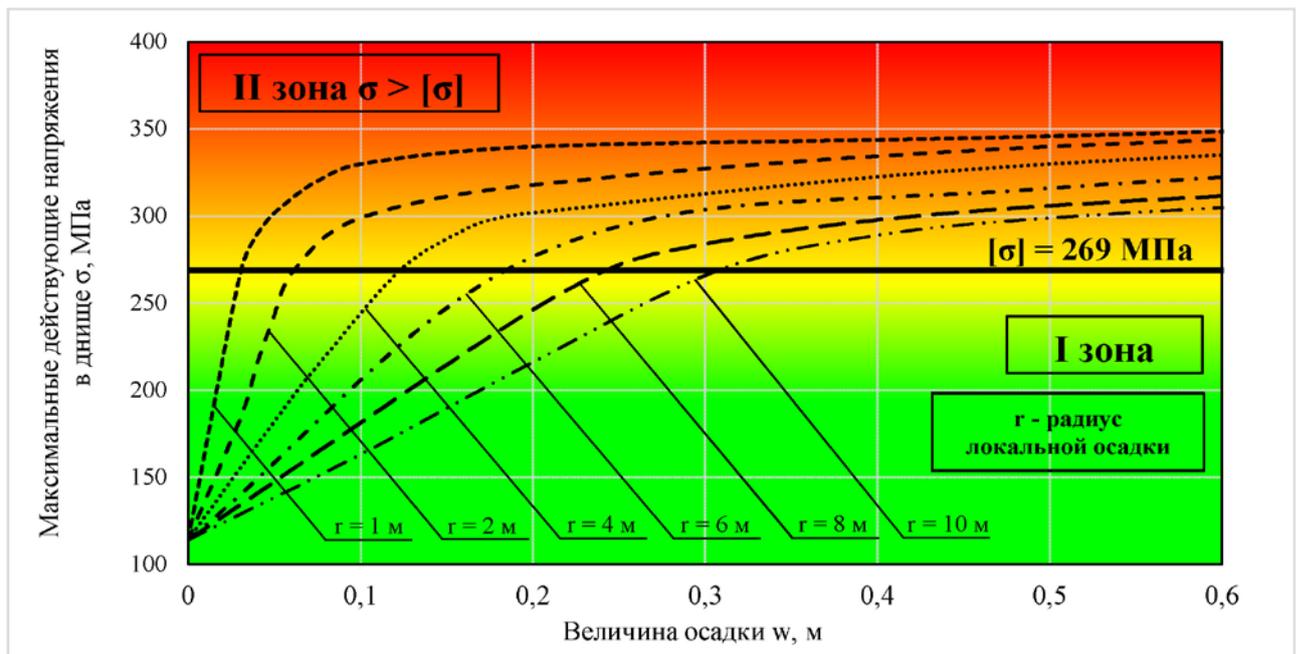


Рисунок 4.5 – Зоны опасности при расположении центра локальной осадки за пределами зоны краевого эффекта при толщине полотнища днища 6 мм

Представленные в методике зависимости позволяют определить геометрические параметры просадочной зоны, при которых действующие в

металлоконструкциях РВС напряжения выходят за границы предельного состояния.

Предложенная методика оценки напряженно-деформированного состояния резервуара РВС-20000 при локальной неоднородности грунтового основания позволяет принимать решение о необходимости вывода резервуара из эксплуатации для проведения ремонтных работ либо о переносе сроков ремонта РВС. Затем по результатам экспертизы промышленной безопасности определяется соответствие резервуара нормам и требованиям промышленной безопасности, устанавливается срок службы резервуара и сроки следующего планового ремонта.

Разработанная методика позволяет обосновать возможность переноса сроков ремонтных работ резервуара РВС-20000 при наличии неравномерной осадки днища, вызванной локальной неоднородностью грунтового основания, что впоследствии снизит экономические издержки предприятия, эксплуатирующего объект, от досрочного проведения ремонта РВС.

Представленная методика прошла апробацию при диагностике и ремонте резервуара РВС-20000 в 2018-2019 гг. В приложении Б представлен акт внедрения методики оценки НДС резервуара РВС-20000 при локальной осадке основания в ПАО «Транснефть-Сибирь».

4.2 Предложения по внесению изменений в НТД в части назначения предельных величин локальных осадок

При определении отклонений размеров и формы центральной части днища необходимо руководствоваться следующими нормативно-техническими документами:

- ГОСТ 31385-2016 «Резервуары вертикальные цилиндрические стальные для нефти и нефтепродуктов»;
- СТО-СА-03-002-2009 «Правила проектирования, изготовления и монтажа вертикальных цилиндрических стальных резервуаров для нефти и нефтепродуктов».

Существует серия других нормативно-технических документов, утвержденных на разных уровнях, однако их применение не получило широкого распространения на практике, поэтому в данной работе они не были рассмотрены.

Местные отклонения центральной части днища от горизонтали не должны превышать значений, регламентированных в действующих российских нормативных документах [20, 50] и представлены в таблице 4.1. Данные требования обоснованы для резервуаров, толщина полотнища днищ которых составляет 9 мм за счет припуска на коррозию. В работе автора [74] отмечено, что ранее для защиты металлоконструкций резервуаров от коррозии применялись защитные лакокрасочные покрытия и при проектировании резервуаров толщина листов полотнища днища принималась равной 6 мм. При этом срок безаварийной эксплуатации большей части построенных ранее резервуаров составляет более 20 лет. Так, пределы деформирования днища при локальных осадках основания, представленные в актуальных нормативных документах, требуют дополнительного обоснования в случае толщины полотнища днища 6 мм.

Таблица 4.1 - Требования актуальной НТД РФ к максимально допустимым осадкам РВС

Предельное отклонение, мм, при диаметре резервуара			
до 12 м	свыше 12 м до 25 м	свыше 25 м до 40 м	свыше 40 м
$w \leq 0,0308 \cdot R$			
Примечание: w – максимальная вертикальная составляющая локальной осадки днища, мм; R – радиус вписанной окружности в область неоднородности, мм.			

В 3 главе было установлено, при предельных значениях локальных осадок, представленных в таблице 4.1, и максимальных эксплуатационных нагрузках в полотнище днища толщиной 6 мм возникают напряжения, превышающие допустимые согласно [20]. Кроме того, было установлено, что положение области

локальной неоднородности, вызывающей осадку, при определенных значениях существенно влияет на изменение НДС цилиндрической стенки резервуара. Однако в отечественных нормативных документах отсутствуют требования к расположению области неоднородности по площади днища при назначении максимально допустимой величины вертикальной составляющей локальной осадки центральной части днища РВС. Такой подход к определению пределов деформирования днища при локальной осадке, вызванной областью неоднородности грунтового основания, не учитывает реальных механизмов формирования НДС резервуара при неравномерной осадке.

Следует отметить, что в стандарте Американского института нефти [109] требования к назначению предельных величин локальных осадок полотнищ днищ зависят от того, затрагивает ли локальная осадка работу стенки или нет. В случае влияния местной осадки днища на работу цилиндрической оболочки РВС, предел деформирования днища назначается по результатам проведения дополнительного анализа напряженно-деформированного состояния резервуара. На основе анализа результатов проведенного в работе эксперимента, сделан вывод о том, что требования НТД РФ имеют несовершенства и требуют гармонизации с зарубежными стандартами в части определения допустимых локальных осадок центральной части днища РВС. Изменение подхода к назначению предельной величины локальной осадки в нормативно-технической документации РФ, позволит установить более реалистичные требования, отражающие действительные условия эксплуатации резервуаров. Требования действующей отечественной НТД к максимально допустимой величине зоны локальной осадки требуют изменений и разграничения в зависимости от толщины полотнища днища РВС. По результатам проведенного численного эксперимента установлены зависимости, на основе которых были разработаны предложения по внесению изменений в НТД (таблица 4.2) в части назначения максимально допустимых величин осадок, вызванных локальной областью неоднородности в грунтовом основании вертикального стального резервуара РВС-20000, для днищ толщиной 6 и 9 мм.

Таблица 4.2 - Предлагаемые критерии, определяющие предельное значение осадки дна РВС-20000, вызванной областью неоднородности основания

Уравнение для определения <u>границы зоны действия краевого эффекта от стенки</u>	
$\delta = 6 \text{ мм}$	$\delta = 9 \text{ мм}$
$X \leq r + 3,0323 \cdot \ln(r) + 1,8956$	$X \leq r + 3,0085 \cdot \ln(r) + 1,5117$
<p>где X – расстояние от стенки до центра окружности вписанной в область локальной неоднородности основания, м; r – радиус окружности вписанной в область локальной неоднородности основания, м;</p>	
Уравнение для определения <u>предельной величины локальной осадки</u> при $\delta = 6 \text{ мм}$	
если $X \geq r + 3,0399 \cdot \ln(r)$, то $w \leq 0,0265 \cdot r$	
если $X < r + 3,0399 \cdot \ln(r)$, то	
$w \leq (0,0825 \cdot r^3 - 1,4373 \cdot r^2 + 6,732 \cdot r + 37,952) \cdot e^{(0,0008r^3 - 0,0187r^2 + 0,1577r - 0,1835)(X-r)}$	
Уравнение для определения <u>предельной величины локальной осадки</u> при $\delta = 9 \text{ мм}$	
если $X \geq r + 3,0086 \cdot \ln(r)$, то $w \leq 0,0308 \cdot r$	
если $X < r + 3,0086 \cdot \ln(r)$, то	
$w \leq (0,0825 \cdot r^3 - 1,6584 \cdot r^2 + 6,965 \cdot r + 38,003) \cdot e^{(0,001r^3 - 0,0213r^2 + 0,1695r - 0,194)(X-r)}$	

Предложенные изменения являются гармонизирующими требования российской нормативно-технической документации к отечественным типоразмерам РВС с международными стандартами.

Выводы по главе

1. В результате исследования установлено, что при наличии локальной неоднородности в грунтовом основании в целом происходит изменение напряженно-деформированного состояния РВС, приводящее к возникновению предельного состояния в его металлоконструкциях.

2. Разработан алгоритм определения напряженно-деформированного состояния РВС-20000 при осадке, вызванной локальной неоднородностью грунтового основания. На основе данных технического обследования РВС разработанный алгоритм позволяет принимать решение о необходимости ремонта резервуара.

3. Разработанная методика позволяет проектным и эксплуатирующим организациям оперативно оценить НДС резервуара РВС-20000 при возникновении локальных осадок, вызванных появлением области неоднородности в грунтовом основании.

4. Сформулированы предложения по внесению изменений в действующую НТД в части определения предельной величины локальной осадки в зависимости от типоразмеров днищ РВС и геометрических параметров области неоднородности основания.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Разработана детализированная численная модель резервуара РВС-20000 в программном комплексе ANSYS, позволяющая учитывать геометрическую и физическую нелинейность при определении НДС РВС. Модель резервуара включает стенку, окрайку, полотнище днища, опорное кольцо в верхнем поясе стенки, листовой настил и балочный каркас стационарной крыши. Достоверность разработанной модели подтверждена верификацией на известном аналитическом решении, предложенном С. П. Тимошенко, отличие результатов расчета не превысило 3%.

2. Создана численная модель взаимодействия резервуара и основания при наличии локальной неоднородности, учитывающая пространственную работу грунта под воздействием максимальных эксплуатационных нагрузок. Разработанная модель учитывает упругое закрепление днища резервуара в контакте с грунтовым основанием и областью неоднородности.

3. Установлены зависимости для определения максимально допустимых значений локальных осадок днища РВС для радиусов области неоднородности основания в интервале от 1 до 10 м при максимальных эксплуатационных нагрузках, без учета краевого эффекта. Получена зависимость, позволяющая определить границу зоны действия краевого эффекта от стенки РВС. Установлены пределы деформирования днища резервуара при локальной неоднородности основания в случае расположения области неоднородности в зоне действия краевого эффекта для днищ толщиной 6 и 9 мм.

4. Разработан алгоритм и методика оценки НДС РВС-20000 при неравномерной осадке, вызванной локальной неоднородностью грунтового основания, позволяющая принимать решение о необходимости вывода резервуара из эксплуатации, либо о переносе сроков ремонтных работ. Сформулированы предложения по корректировке требований российской нормативно-технической документации в части назначения предельных величин локальных осадок днища, гармонизирующие НТД РФ с международными стандартами.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

КЭ	Конечный элемент
МКЭ	Метод конечных элементов
ММГ	Многолетнемерзлый грунт
НДС	Напряженно-деформированное состояние
НТД	Нормативно-техническая документация
РВС	Резервуар вертикальный стальной
СЛАУ	Система линейных алгебраических уравнений

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Адлер, Ю. П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю. П. Адлер, Е. В. Маркова, Ю. В. Грановский. – Москва : Наука, 1976. – 279 с. – Текст : непосредственный.
2. Алексеев, А. А. Разрушения при неравномерных осадках днищ резервуаров, эксплуатирующихся в условиях Арктики / А. А. Алексеев. – Текст : непосредственный // Europe Science . – 2015. - № 8(9). – С. 35-37.
3. Бате, К. Численные методы анализа и метод конечных элементов / К. Бате, Е. Вилсон ; пер. с англ. – Москва : Стройиздат, 1982. – 448 с. – Текст : непосредственный.
4. Березин, В. Л. Об эксплуатационной надежности нефтезаводских резервуаров / В. Л. Березин, А. Г. Гумеров, К. Е. Ращепкин, Э. М. Ясин. – Текст : непосредственный // Транспорт и хранение нефти и нефтепродуктов. – 1965. - №4. – С. 204-207.
5. Березин, В. Л. Прочность и устойчивость резервуаров и трубопроводов / В. Л. Березин, В. Е. Шутов. – Москва : Недра, 1973. – 200 с. - Текст : непосредственный.
6. Березин, В. Л. Устойчивость верхних поясов стальных вертикальных цилиндрических резервуаров / В. Л. Березин, А. Г. Гумеров, Э. М. Ясин. – Текст : непосредственный // Известия вузов. Нефть и газ. – 1969. - №4. – С. 81-85.
7. Богушевская, Е. М. Проектирование оснований и фундаментов резервуаров для нефти объемом 10 – 100 тыс. м³ / Е. М. Богушевская, Л. А. Димов, И. Л. Димов. - Текст : непосредственный // Трубопроводный транспорт: теория и практика. – 2006. - № 3(5). – С. 41-45.
8. Большаков, Н. В. Осадка фундаментов при сооружении объектов нефтегазовой промышленности на слабых грунтах / Н. В. Большаков, А. С. Гохман. – Москва : ВНИИСТ, 1972. – 69 с. – Текст : непосредственный.
9. Бородавкин, П. П. Ремонт металлических резервуаров / П. П. Бородавкин, Ю. К. Садырин. – Москва : ВНИИОЭНГ, 1967. – 76 с. – Текст : непосредственный.

10. Бородавкин, П. П. Характер осадки резервуаров и ее влияние на эксплуатационную надежность при хранении нефтепродуктов / П. П. Бородавкин, Л. С. Маслов, О. Б. Шадрин. – Текст : непосредственный // РНТС ВНИИОНГ. – 1965. – № 6. – С. 26-29.

11. Буренин, В. А. Исследование влияния неравномерных осадков на напряженно-деформированное состояние стального вертикального цилиндрического резервуара : 05.15.07 : дисс. ... канд. техн. наук / В. А. Буренин ; УГНТУ. – Уфа, 1979. – 167 с. – Текст : непосредственный.

12. Буренин, В. А. Прогнозирование индивидуального остаточного ресурса стальных вертикальных резервуаров : 05.15.13 : дисс. ... док. техн. наук / В. А. Буренин ; УГНТУ. – Уфа, 1994. – 270 с. – Текст : непосредственный.

13. Васильев, Г. Г. Анализ причин аварий вертикальных стальных резервуаров / Г. Г. Васильев, А. П. Сальников. - Текст : непосредственный // Нефтяное хозяйство. – 2015. – № 2. – С. 106-108.

14. Волчков, А. Р. Фундаменты вертикальных стальных резервуаров для нефти и нефтепродуктов / А. Р. Волчков. – Текст : непосредственный // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2014. - № 4(16). – С. 52-56.

15. Вопросы эксплуатационной надежности резервуаров на нефтеперерабатывающих заводах / В. Л. Березин, А. А. Мацкин, А. Г. Гумеров, Э. М. Ясин. – Москва : ЦНИИТЭнефтехим, 1971. – 67 с. - Текст : непосредственный.

16. Галеев, В. Б. Аварии резервуаров и способы их предупреждения : научно-техническое издание / В. Б. Галеев, Д. Ю. Гагарин, Ю. А. Фролов. – Уфа : ГУП «Уфимский полиграфкомбинат», 2004. – 164 с. - Текст : непосредственный.

17. Галеев, В. Б. Напряженно-деформированное состояние резервуаров, построенных на слабых переувлажненных грунтах : 05.15.13 : дисс. ... док. техн. наук / В. Б. Галеев ; ТИИ. – Тюмень, 1987. – 668 с. - Текст : непосредственный.

18. Горелов, А. С. Неоднородные грунтовые основания и их влияние на работу вертикальных стальных резервуаров : монография / А. С. Горелов. – Санкт-

Петербург : Недра, 2009. – 220 с. - Текст : непосредственный.

19. ГОСТ 27751-2014. Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения : межгосударственный стандарт : утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 11 декабря 2014 г. N 1974-ст : введ. впервые : дата введ. 2015-07-01 / разработан ОАО «НИЦ «Строительство», ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко». – Москва : Стандартинформ, 2015. – 16 с. – Текст : непосредственный.

20. ГОСТ 31385-2016. Резервуары вертикальные цилиндрические стальные для нефти и нефтепродуктов. Общие технические условия : межгосударственный стандарт : утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 31 августа 2016 г. N 982-ст : взамен ГОСТ 31385-2008 : дата введ. 2017-03-01 / разработан ЗАО «ЦНИИПСК им. Мельникова», ООО «ГТИ», ООО «НИИ Транснефть». – Москва : Стандартинформ, 2016. – 96 с. – Текст : непосредственный.

21. Грученкова, А. А. Анализ причин разрушения цилиндрических стальных резервуаров для хранения нефти / А. А. Грученкова, А. А. Тарасенко. – Текст : непосредственный // Транспорт и хранение углеводородного сырья»: материалы XIII Междунар. науч.-техн. конф. – Тюмень, 2019. – Т. 1. – С. 177-180.

22. Грученкова, А. А. Исследование НДС резервуара при локальных осадках центральной части днища / А. А. Грученкова, А. А. Тарасенко. – Текст : непосредственный // Транспорт и хранение углеводородного сырья»: материалы XIII Междунар. науч.-техн. конф. – Тюмень, 2019. – Т. 1. – С. 173-177.

23. Грученкова, А. А. Напряженно-деформированное состояние резервуара на грунтовом основании с локальной неоднородностью / А. А. Грученкова, А. А. Тарасенко. – Текст : непосредственный // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 2019. - № 3. – С. 96-101.

24. Грученкова, А. А. Определение деформаций центральной части днища РВС при наличии зон неоднородности грунтового основания / А. А. Грученкова, А. А. Тарасенко, П. В. Чепур. – Текст : непосредственный // Перспективы развития

фундаментальных наук: сборник трудов XIII Междунар. конф. – Томск, 2016. – Т. 6. – С. 43-45.

25. Дегтярев, П. А. Влияние области неоднородности грунтового естественного основания резервуара на его напряженно -деформированное состояние : 25.00.19 : дисс. ... канд. техн. наук / П. А. Дегтярев ; ТюмГНГУ. – Уфа, 2008. – 131 с. – Текст : непосредственный.

26. Егоров, К. Е. К расчету деформаций оснований / К. Е. Егоров. – Москва : ФГУП «ВНИИНТПИ», 2002. – 400 с. – Текст : непосредственный.

27. Егоров, Е. А. Особенности работы и инженерный расчет вертикальных цилиндрических резервуаров / Е. А. Егоров. – Текст : непосредственный // Нефтяное хозяйство. – 1977. - № 12. – С. 48-59.

28. Захарова, М. И. Анализ и оценка риска аварий резервуаров и газопроводов при низких температурах : 05.26.03 : дисс. ... канд. техн. наук / М. И. Захарова ; УГНТУ. – Уфа, 2015. – 140 с. – Текст : непосредственный.

29. Зедгинидзе, И. Г. Планирование эксперимента для исследования многокомпонентных систем / И. Г. Зедгинидзе. – Москва : Наука, 1976. – с. 390. – Текст : непосредственный.

30. Зенкевич, О. Метод конечных элементов в технике / О. Зенкевич; пер. с англ. – Москва : Мир, 1975. – 543 с. - Текст : непосредственный.

31. Землянский, А. А. Принципы конструирования и экспериментально-теоретические исследования крупногабаритных резервуаров : 05.23.01, 05.23.02 : дисс. ... док. техн. наук / А. А. Землянский ; СГТУ. – Балаково, 2006. – 416 с. – Текст : непосредственный.

32. Инженерно-геологические изыскания для строительства. Часть I. Общие правила производства работ : СП 11-105-97 : утв. Госстроем России 14.10.97 : введ. в действие с 01.03.98. – Москва : Стройиздат, 1997. – 96 с. – Текст : непосредственный.

33. Инженерные изыскания для строительства. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 11-02-96 : СП 47.13330.2012 : утв. Госстроем

России 10.12.12 : введ. в действие с 01.07.13. – Москва : Аналитик, 2012. – 116 с. – Текст : непосредственный.

34. Инженерный анализ в ANSYS Workbench: учебник / В. А. Бруйка, В. Г. Фокин, Е.А. Солдусова [и др.]. – Самара : СамГТУ, 2010. – 271 с. – Текст : непосредственный.

35. Кандаков, Г. П. Проблемы отечественного резервуаростроения и возможные пути их решения / Г. П. Кандаков. – Текст : непосредственный // Промышленное и гражданское строительство. – 1998. – № 5. – С. 24 – 26.

36. Кондрашева, О. Г. Причинно-следственный анализ аварий вертикальных стальных резервуаров / О. Г. Кондрашева, М. Н. Назарова. – Текст : непосредственный // Нефтегазовое дело. – 2004. – № 2. – С. 36-43.

37. Коновалова, О. П. Подготовка оснований резервуаров с учетом консолидационных свойств слабых грунтов : 25.00.19 : дисс. ... канд. техн. наук / О. П. Коновалова ; ТюмГНГУ. – Тюмень, 2002. – 176 с. – Текст : непосредственный.

38. Коробков, Г. Е. Численное моделирование напряженно-деформированного состояния и устойчивости трубопроводов и резервуаров в осложненных условиях эксплуатации / Г. Е. Коробков, Р. М. Зарипов, И. А. Шаммазов. – Санкт-Петербург : Недра, 2009. – 410 с. – Текст : непосредственный.

39. Коршак, А. А. Диагностика объектов нефтеперекачивающих станций: учебник / А. А. Коршак, Л. Р. Байкова. – Уфа : ДизайнПолиграф-Сервис, 2008. – 176 с. – Текст : непосредственный.

40. Кршупка, В. Коробление корпусов крупных цилиндрических резервуаров под влиянием осадки / В. Кршупка ; пер. с чеш. – Текст : непосредственный // Инженерски ставби. – 1974. - № 11. – С. 538-42.

41. Кушнер, С. Г. Расчет осадок оснований зданий и сооружений / С. Г. Кушнер. – Киев : Будивэльнык, 1990. – 144 с. – Текст : непосредственный.

42. Лаевский, Ю. М. Метод конечных элементов (основы теории, задачи) / Ю. М. Лаевский. – Новосибирск : Новосибирский государственный университет,

1999. – 166 с. – Текст : непосредственный.

43. Лебедев, В. Д. Напряженно-деформированное состояние вертикального резервуара с учетом консолидации грунтового основания : 25.00.19 : дисс. ... канд. техн. наук / В. Д. Лебедев ; ТюмГНГУ. – Тюмень, 2006. – 125 с. – Текст : непосредственный.

44. Любушкин, В. В. Исследование осадки основания и напряженного состояния днища стального вертикального резервуара : 05.15.07 : дисс. ... канд. техн. наук / В. В. Любушкин ; УГНТУ. – Уфа, 1979. – 229 с. – Текст : непосредственный.

45. Методика по выбору типов фундаментов зданий и сооружений объектов магистральных нефтепроводов и нефтепродуктопроводов в зависимости от инженерно-геологических условий площадки строительства : РД-91.200.00-КТН-180-14 : утв. ОАО «АК «Транснефть» 06.10.14 : введ. в действие 20.10.14. – Москва : ОАО «АК «Транснефть», 2014. – 185 с. – Текст : непосредственный.

46. Монтгомери, Д. К. Планирование эксперимента и анализ данных / Д. К. Монтгомери. – Ленинград : Судостроение, 1980. – 384 с. – Текст : непосредственный

47. Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85* (с Изменениями N 1, 2) : СП 20.13330.2016 : утв. приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации (Минстрой России) 03.12.16 : введ. в действие с 04.06.17. – Москва : Издательство стандартов, 2016. – 102 с. – Текст : непосредственный.

48. Нехаев, Г. А. Проектирование и расчет стальных цилиндрических резервуаров и газгольдеров низкого давления / Г. А. Нехаев. – Москва : Издательство АСВ, 2005. – 216 с. – Текст : непосредственный.

49. Потапов, А. Ю. Влияние деформационных характеристик грунтов основания на работу стенки и днища резервуара : 25.00.19 : дисс. ... канд. техн. наук / А. Ю. Потапов ; ТюмГНГУ. – Тюмень, 2006. – 106 с. – Текст : непосредственный.

50. Правила проектирования, изготовления и монтажа вертикальных цилиндрических стальных резервуаров для нефти и нефтепродуктов : СТО-СА-03-002-09 : утв. Ассоциацией «Ростехэкспертиза» 19.06.09 : введ. в действие 01.07.09. – Москва : Издательство стандартов, 2009. – 331 с.

51. Правила ремонта и реконструкции резервуаров для хранения нефти объемом 1000 – 50000 куб. м. : РД-23.020.00-КТН-283.09 : утв. ОАО «АК «Транснефть» 01.10.09 : введ. в действие 25.10.09. – Москва : ОАО «АК «Транснефть», 2009. – 115 с. – Текст : непосредственный.

52. Протоdjяконов, М. М. Методика рационального планирования экспериментов / М. М. Протоdjяконов, И. И. Тедер. – Москва : Наука, 1970. – 76 с. – Текст : непосредственный.

53. Розенштейн, И. М. Аварии и надежность стальных резервуаров / И. М. Розенштейн. – Москва : Недра, 1995. – 253 с. – Текст : непосредственный.

54. Розин, Л. А. Метод конечных элементов в применение к упругим системам / Л. А. Розин. – Москва : Стройиздат, 1977. – 130 с. – Текст : непосредственный.

55. Румшинский, Л. З. атематическая обработка результатов эксперимента / Л. З. Румшинский. – Москва : Наука, 1971. – 192 с. – Текст : непосредственный.

56. Сальников, А. П. Оценка напряженно-деформированного состояния резервуаров по результатам наземного лазерного сканирования : 25.00.19 : дисс. ... канд. техн. наук / А. П. Сальников ; РГУ нефти и газа им. И. М. Губкина. – Москва, 2016. – 167 с. – Текст : непосредственный.

57. Сафарян, М. К. Металлические резервуары и газгольдеры / М. К. Сафарян. – Москва : Недра, 1987. – 200 с. – Текст : непосредственный.

58. Сафарян, М. К. Основные положения расчета цилиндрических и сферических оболочек на устойчивость (применительно к резервуаростроению) / М. К. Сафарян. – Текст : непосредственный // Монтажные работы в строительстве. – 1967. – № 2. – С. 20-33.

59. Сафарян, М. К. Проектирование и сооружение стальных резервуаров /

М. К. Сафарян, О. М. Иванов. – Москва : Гостоптехиздат, 1961. – 328 с. – Текст : непосредственный.

60. Слепнев, В. И. Напряженно-деформированное упруго-пластическое состояние стальных вертикальных цилиндрических резервуаров при неравномерных осадках оснований : 05.23.01 : дисс. ... канд. техн. наук / В. И. Слепнев ; МИСИ. – Москва, 1988. – 223 с. – Текст : непосредственный.

61. Сооружения промышленных предприятий. Актуализированная редакция СНиП 2.09.03-85 (с Изменениями N 1, 2) : СП 43.13330.2012 : утв. приказом Минрегиона России 29.12.11 : введ. в действие с 01.01.13. – Москва : Стройиздат, 2012. – 113 с. – Текст : непосредственный.

62. Сотников, С. Н. Проектирование и строительство резервуаров на слабых грунтах / С. Н. Сотников, Р. А. Мангушев. – Москва : ВНИИОЭНГ, . – 51 с.

63. Стренг, Г. Теория метода конечных элементов / Г. Стренг, Дж. Фикс ; пер. с англ. – Москва : Мир, 1977. – 351 с. – Текст : непосредственный.

64. Стулов, Т. Т. Расчет наземных резервуаров с учетом устойчивости основания / Т. Т. Стулов. – Текст : непосредственный // Труды МИНХ и ГП. – 1967. – № 5. – С. 95-105.

65. Тарасенко, А. А. Анализ различий в требованиях отечественных нормативов и стандартов США при развитии неравномерной осадки днища резервуара / А. А. Тарасенко, А. А. Грученкова, М. А. Тарасенко. – Текст : непосредственный // Нефтяное хозяйство. – 2016. - № 8. – С. 132-135.

66. Тарасенко, А. А. Деформирование верхнего края оболочки при развитии неравномерных осадок резервуара / А. А. Тарасенко, П. В. Чепур, Д. А. Тарасенко. – Текст : непосредственный // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 6-3. – С. 485-489.

67. Тарасенко, А. А. Закономерности деформирования металлоконструкций крупногабаритного вертикального сварного резервуара при наличии зон проседания основания / А. А. Тарасенко, А. А. Грученкова, П. В. Чепур. – Текст : непосредственный // Трубопроводный транспорт: теория и практика. – 2016. - №

1(53). – С. 32-37.

68. Тарасенко, А. А. Использование критериев стандарта API-653 для оценки допустимой величины осадки днища резервуаров / А. А. Тарасенко, П. В. Чепур, А. А. Грученкова. – Текст : непосредственный // Фундаментальные исследования. – 2014. - № 12-7. – С. 1418-1422.

69. Тарасенко, А. А. Исследование закономерностей развития неравномерных осадок резервуаров численными методами: монография / А. А. Тарасенко, П. В. Чепур, А. А. Грученкова. – Новосибирск : Наука, 2017. – 172 с. - Текст : непосредственный.

70. Тарасенко, А. А. Исследование изменения напряженно-деформированного состояния вертикального стального резервуара при развитии неравномерной осадки наружного контура днища / А. А. Тарасенко, П. В. Чепур, С. В. Чирков. – Текст : непосредственный // Фундаментальные исследования. – 2013. – № 10-15. – С. 3409-3413. - С. 1698-1703.

71. Тарасенко, А. А. Модель резервуара в среде ANSYS Workbench 14.5 / А. А. Тарасенко, П. В. Чепур, С. В. Чирков, Д. А. Тарасенко. – Текст : непосредственный // Фундаментальные исследования. – 2013. – № 10-15. – С. 3404-3408.

72. Тарасенко, А. А. Напряженно-деформированное состояние крупногабаритных резервуаров при ремонтных работах : 05.15.13 : дисс. ... канд. техн. наук / А. А. Тарасенко ; ТИИ. – Тюмень, 1991. – 253 с. - Текст : непосредственный.

73. Тарасенко, А. А. Обоснование критериев для предельных осадок оснований резервуара PBC-20000 / А. А. Тарасенко, П. В. Чепур, В. В. Миронов, А. А. Грученкова. – Текст : непосредственный // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 2016. - № 4. – С. 98-103.

74. Тарасенко, А. А. Определение действующих напряжений в полотнищах днищ резервуаров отечественных типоразмеров при локальных просадках оснований / А. А. Тарасенко, П. В. Чепур, А. А. Грученкова. – Текст :

непосредственный // *Фундаментальные исследования*. – 2015. – № 2-8. – С. 1665-1670.

75. Тарасенко, А. А. Оценка влияния трубопроводов системы подслоного пожаротушения на напряженное состояние резервуара при осадке основания / А. А. Тарасенко, П. В. Чепур, А. А. Грученкова, С. С. Соколов. – Текст : непосредственный // *Фундаментальные исследования*. – 2014. – № 11-8. – С. 1698-1703.

76. Тарасенко, А. А. Разработка научных основ методов ремонта вертикальных стальных резервуаров : 05.15.13 : дисс. ... док. техн. наук / А. А. Тарасенко ; ТюмГНГУ. – Тюмень, 1999. – 299 с. - Текст : непосредственный.

77. Тарасенко, А. А. Совместная работа неоднородного грунтового основания с центральной частью днища вертикального стального резервуара / А. А. Тарасенко, А. А. Грученкова, П. В. Чепур. – Текст : непосредственный // *Трубопроводный транспорт: теория и практика*. – 2016. – № 3(55). – С. 34-38.

78. Тарасенко, А. А. Эволюция взглядов на вопросы определения величины допустимых осадок резервуаров / А. А. Тарасенко, П. В. Чепур. – Текст : непосредственный // *Фундаментальные исследования*. – 2014. – № 12-1. – С. 67-84.

79. Тимошенко, С. П. Пластинки и оболочки / С. П. Тимошенко, С. Войновский-Кригер. – Москва : Наука, 1966. – 636 с. – Текст : непосредственный.

80. Тимошенко, С. П. Теория упругости / С. П. Тимошенко, Дж. Гудьер. – Москва : Наука, 1979. – 560 с. – Текст : непосредственный.

81. Флорин, В. А. Основы механики грунтов / В. А. Флорин. – Ленинград ; Москва : Госстройиздат, 1959. – Т. 1. – 357 с. – Текст : непосредственный.

82. Фундаменты стальных резервуаров и деформации их оснований : научное издание / П. А. Коновалов, Р. А. Мангушев, С. Н. Сотников [и др.]. – Москва : Издательство Ассоциация строительных вузов, 2009. – 336 с. – Текст : непосредственный.

83. Ханухов, Х. М. Нормативно-техническое и организационное обеспечение

безопасной эксплуатации резервуарных конструкций / Х. М. Ханухов, А. В. Алипов. – Текст : непосредственный // Предотвращение аварий зданий и сооружений : сборник научных трудов / Российская государственная библиотека. – Москва, 2011. – Вып. 10. – С. 384-422.

84. Хоперский, Г. Г. Исследование напряженно-деформированного состояния стенки резервуара при неравномерных осадках основания : 05.15.13 : дисс. ... канд. техн. наук / Г. Г. Хоперский ; ТюмГНГУ. – Тюмень, 1998. – 197 с. – Текст : непосредственный.

85. Цытович, Н. А. Механика мерзлых грунтов: учеб. пособие / Н. А. Цытович. - Москва : Высшая школа, 1973. - 448 с. - Текст : непосредственный.

86. Чепур, П. В. Напряженно-деформированное состояние резервуара при развитии неравномерных осадок его основания : 25.00.19 : дисс. ... канд. техн. наук / П. В. Чепур ; ТюмГНГУ. – Москва, 2015. – 181 с. – Текст : непосредственный.

87. Чепур, П. В. Анализ возможности использования критериев стандарта API-653 для оценки неравномерной осадки резервуаров отечественных типоразмеров / П. В. Чепур, А. А. Тарасенко, А. А. Грученкова. – Текст : непосредственный // Фундаментальные исследования. – 2014. - № 12-3. – С. 514-519.

88. Чепур, П. В. Влияние параметров неравномерной осадки на возникновение предельных состояний в резервуаре / П. В. Чепур, А. А. Тарасенко. – Текст : непосредственный // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 8(7). – С. 1560-1564.

89. Чепур, П. В. Оценка влияния трубопроводов системы аварийного сброса на напряженное состояние конструкции резервуара при развитии осадок основания / П. В. Чепур, А. А. Тарасенко, С. С. Соколов. – Текст : непосредственный // Фундаментальные исследования. - 2014. - № 11-4. - С. 804-808.

90. Чепур, П. В. Оценка воздействия приемо-раздаточного патрубка при развитии осадки резервуара / П. В. Чепур, А. А. Тарасенко. – Текст : непосредственный // Фундаментальные исследования. - 2014. - № 11-3. - С. 540-

544.

91. Чепур, П. В. Численный анализ влияния жесткости газоуравнительной системы при развитии осадок резервуара / П. В. Чепур, А. А. Тарасенко, А. А. Грученкова, И. В. Антонов. – Текст : непосредственный // *Фундаментальные исследования*. - 2014. - № 11-6. - С. 1292-1296.

92. Шутов, В. Е. Оптимизация резервуарных конструкций для хранения нефтепродуктов : 05.15.07 : дисс. ... док. техн. наук / В. Е. Шутов ; МИНХиГП. – Москва, 1983. – 374 с. – Текст : непосредственный.

93. Ямамото, С. Напряжения и деформации, образующиеся в цилиндрических резервуарах вследствие неравномерного оседания основания / С. Ямамото, К. Кавано ; пер. с япон. – Москва : ВЦП, 1977. – 18 с. – Текст : непосредственный.

94. Ямамото, С. Расследование причины аварии нефтехранилища / С. Ямамото, К. Кавано. – Сан-Диего : Калифорния, 1976. – Текст : непосредственнойю

95. Ясин, Э. М. Устойчивость верхних поясов вертикальных цилиндрических резервуаров для хранения нефтепродуктов / Э. М. Ясин, К. Е. Ращепкин. – Текст : непосредственный // *Нефтяное хозяйство*. – 1967. - № 3. – С. 57-59.

96. Akhavan-Zanjani, A. Numerical study on the effect of uneven settlements of oil storage tank / A. Akhavan-Zanjani, S. R. Maddah-Sadatieh. - Text : electronic // *Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*. - 2009. –P. 28-30.

97. Bell R. A. Settlement Comparison Used in Tank-Failure Study / R. A. Bell, J. Iwakiri. - Text : electronic // *Journal of the geotechnical division*. – 1980. – V. 106. – P. 153-169.

98. Carlson E. D. Tank Foundation in Eastern Venezuela / E. D. Carlson, S. P. Frisan. - Text : electronic // *Journal of the soil mechanics and foundations engineering division*. – 1961. – V. 87. – P. 69-89.

99. Clarke J. S. Survey of Oil Storage Tanks / J. S. Clarke. – Text : electronic // *Annales de L'Institut Belge du Petrole*. – 1969. - № 6. – P. 15-28.

100. Gruchenkova A. Justification of the necessity to harmonize Russian and international standards concerning the determination of allowable VST immersion / A. Gruchenkova, A. Tarasenko, P. Chepur, D. Tarasenko. – Direct text // AIP Conferences Proceedings. – 2017. – V. 1800. – P. 040019.

101. Herber K. H. Eckverbindungen von tanken and behaltern / K. H. Herber. – Text : electronic // Del Stahlbau. – 1955. – V. 10. – P. 252-257.

102. Lambe T. W. Reclaimed land in Kawasaki city / T. W. Lambe. – Text : electronic // Soil mechanics and foundation division. – 1969. – V. 95. – P. 46-58.

103. Langeveld J. M. The design of large steel storage tanks for crude oil and natural gas / J. M. Langeveld. – Text : electronic // Proceedings of the Annual Meeting of The International Institute of Welding. – 1974. - P. 35-95.

104. Malik Z. Ovalization of cylindrical tanks as a result of foundation settlement / Z. Malik, J. Morton, C. Ruiz. – Text : electronic // Journal of Strain Analysis. – 1977. – V. 12. - № 4. – P. 339-348.

105. Manufacture of vertical steel welded non-refrigerated storage tanks with butt-welded shells for the petroleum industry : BS 2654. - Great Britain : Petroliam Nasional Berhad, 1989. – 103 p.

106. Penman A. D. Soil-Structure interaction and deformation problems with large oil tanks / A. D. Penman. – Text : electronic // Proceedings of the International Symposium on Soil-Structure Interaction. – 1977. – V. 1. - P. 521-526.

107. Specification for the design and manufacture of site built, vertical, cylindrical, flat-bottomed, above ground, welded, steel tanks for the storage of liquids at ambient temperature and above : EN 14015-2004. – London, 2004. – 511 p.

108. Sullivan R. A. Differential settlement of cylindrical oil tanks / R. A. Sullivan, J. F. Nowicki. – Text : electronic // Proceedings of conference on settlement of structures. – 1974. – P. pp. 420-424.

109. Tank inspection, repair, alteration, and reconstruction : API-653. – USA, Washington : American Petroleum Institute, 2009. – 166 p. – Text : electronic.

110. Tarasenko A. Determining deformations of the central part of a vertical steel

tank in the presence of the subsoil base inhomogeneity zones / A. Tarasenko, P. Chepur, A. Gruchenkova. – Direct text // AIP Conferences Proceedings. – 2016. – V. 1772. – P. 060011.

111. Tarasenko A. Study of deformations in a large-capacity oil storage tank in the presence of subgrade inhomogeneity zones / A. Tarasenko, P. Chepur, A. Gruchenkova. – Direct text // MATEC Web of Conferences. – 2016. – V. 73. – P. 01025.

112. Tarasenko A. The use of a numerical method to justify the criteria for the maximum settlement of the tank foundation / A. Tarasenko, P. Chepur, A. Gruchenkova. – Direct text // AIP Conferences Proceedings. – 2017. – V. 1899. – P. 060003.

113. Welded tanks for oil storage : API-650. – USA, Washington : American Petroleum Institute, 2013. – 514 p. – Text : electronic.

Приложение А (справочное)

Свидетельство о верификации программного комплекса ANSYS



Приложение Б (справочное)

Акт внедрения результатов исследования



АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО «ТРАНСНЕФТЬ-СИБИРЬ»
ул. Республики, 139, г. Тюмень, Россия, 625027. Телефон: (3452) 32-27-10. Факс: (3452) 20-25-97, Телетайп: 235100 Нефть
ОКПО 00139229, ИНН/КПП 7201000726/997250001

31.05.2019 № ТСУБ-01-160/232-1



УТВЕРЖДАЮ
Заместитель генерального
директора по эксплуатации
АО «Транснефть – Сибирь»
А.А. Белобородов
31 мая 2019 г.

АКТ

внедрения «Методики оценки напряженно-деформированного состояния резервуара РВС-20000 при локальной неоднородности грунтового основания»

Авторы:

Грученкова Алеся Анатольевна,
Тарасенко Александр Алексеевич

Комиссия в составе:

Председатель:	
Заместитель генерального директора по эксплуатации	А.А. Белобородов

Члены комиссии:

Начальник отдела эксплуатации нефтепроводов и нефтепродуктопроводов	Е.В. Ваккер
Начальник технического отдела	П.Ф. Сильницкий

составила настоящий акт о том, что «Методика оценки напряженно-деформированного состояния резервуара РВС-20000 при локальной неоднородности грунтового основания» прошла апробацию при диагностике и ремонте РВС-20000 в 2018-2019 гг.

Разработаны численные модели процессов развития неравномерных осадок в полотнище днища и окрайке РВС-20000 с учетом влияния стационарной крыши и кольца жесткости. Для разных размеров просадочных зон и расстояний до уторного узла резервуара определены величины предельно допустимых осадок, при которых наступают предельные состояния в металлоконструкциях.

Сравнение отечественных и зарубежных нормативов показало, что их гармонизация может привести к получению существенного экономического эффекта, вызванного отказом от выполнения некоторых видов ремонта РВС, поскольку требования отечественной НТД существенно завышены. Сформулированы предложения о внесении изменений в ГОСТ 31385-2016 и СТО-СА-03-002-2009.

Выполнен анализ результатов диагностики резервуаров РВС-20000, параметры развития неравномерной осадки при наличии локальных просадочных зон учтены при разработке проектов ремонта, реконструкции и проектов производства работ ООО НПП «Симплекс».

Подписи:

/ Начальник отдела эксплуатации нефтепроводов и нефтепродуктопроводов

Зам. Начальник технического отдела

Е.В. Ваккер

Н.И. Блиндин
П.Ф. Сильницкий