

*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

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Тюмень - 2020

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Тюменский индустриальный университет» на кафедре «Транспорт углеводородных ресурсов»

Научный руководитель **Тарасенко Александр Алексеевич**,  
доктор технических наук, профессор,  
ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет», профессор кафедры «Транспорт углеводородных ресурсов»

Официальные оппоненты: **Лукьянова Ирина Эдуардовна**,  
доктор технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет», профессор кафедры «Сооружение и ремонт газонефтепроводов и газонефтехранилищ»

**Сальников Антон Павлович**,  
кандидат технических наук, ФГАОУ ВО «Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина», доцент кафедры «Сооружение и ремонт газонефтепроводов и хранилищ»

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Самарский государственный технический университет», г. Самара

Защита состоится «22» октября 2020 года в 12:00 ч. на заседании диссертационного совета Д 212.273.11 при ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет» по адресу: 625000, Тюменская область, г. Тюмень, ул. Володарского, 38, ауд. 219.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотечно-информационном комплексе ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет» и на сайте [www.tyuiu.ru](http://www.tyuiu.ru).

Автореферат диссертации разослан «07» сентября 2020 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета

Пономарева Татьяна Георгиевна

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**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.

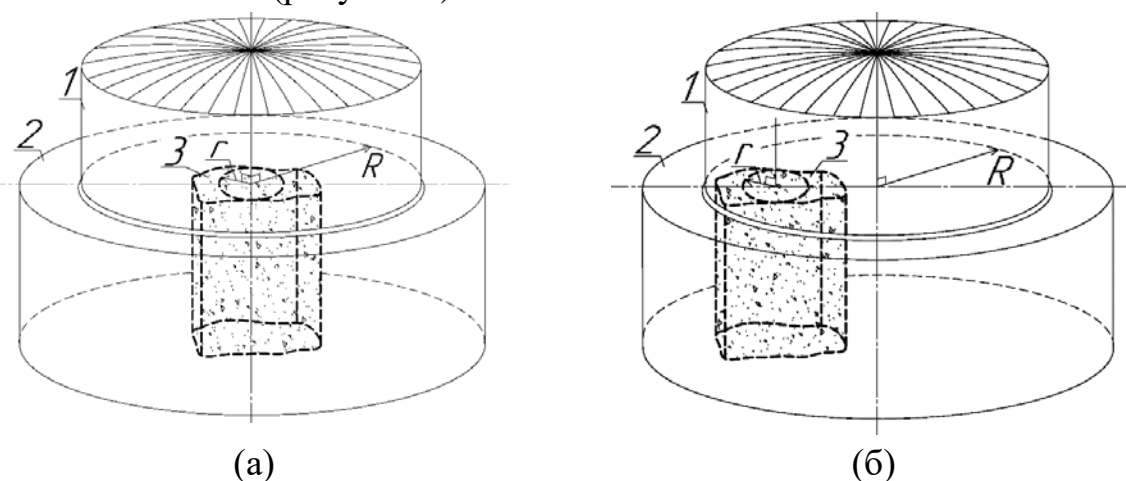
## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** приведена общая характеристика работы, обоснована её актуальность, сформулированы цель и задачи исследования, отражены основные положения, выносимые на защиту, научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы.



**В первой главе** проведен обзор литературно-документальных источников по вопросу причин аварий резервуаров. Рассмотрены случаи аварий РВС, вызванных неравномерными осадками оснований. Приведена классификация неравномерных осадок по площади днища. Выполнен анализ требований российской и зарубежной НТД к величинам допускаемых осадок. Проведен обзор научных исследований, посвященных изучению изменения НДС РВС при неравномерных осадках.

Анализ причин аварий резервуаров показал, что неравномерные осадки, вызванные локальной неоднородностью грунтового основания, являются причиной разрушения РВС в 46% случаев. Локальные осадки развиваются в результате изменения структуры грунтового массива под воздействием эксплуатационных нагрузок и собственного веса грунта, а также дополнительных факторов, таких как оттаивание ледовых прослоек в замерзшем грунте, изменение уровня грунтовых вод. Нормативными документами регламентировано количество скважин, пробуриваемых при проведении изысканий: для резервуаров объемом более  $5000 \text{ м}^3$  - не менее 5 скважин, для резервуаров объемом менее  $5000 \text{ м}^3$  - 4 скважины. Учитывая, что площадь оснований резервуаров может достигать  $7000 \text{ м}^2$ , геологические разрезы, построенные по данным изысканий, не отражают в полной мере действительный грунтовой состав естественного основания, что приводит к появлению просадочных зон при эксплуатации. В пределах площади днища локальная неоднородность может располагаться в его центральной части и вблизи стенки РВС (рисунок 1).



1 - стенка, 2 - подготовленное основание, 3 - локальная неоднородность;  
 $R$  - радиус РВС,  $r$  - радиус окружности, вписанной в область неоднородности

Рисунок 1 - Расположение локальной неоднородности основания:  
 в центральной части днища (а), вблизи стенки (б)

Российская и зарубежная НТД имеет существенные различия в требованиях к назначению предельной величины локальной осадки днищ РВС. Зарубежные стандарты при назначении максимально допустимой осадки, в случае расположения локальной неоднородности основания вблизи стенки, требуют проведения дополнительного анализа НДС резервуара.

В российской НТД требования к предельной величине локальной осадки днища не дискретизированы на случаи расположения области неоднородности в центральной части РВС и вблизи стенки (таблица 1).

Таблица 1 - Требования актуальной НТД в части назначения максимально допустимых величин локальных осадок днища РВС

Нормативный документ	Критерий оценки	
СТО-СА-03-002-2009 ГОСТ 31385-2016	$w \leq 0,0308 \cdot r$	
API-653	Центральная часть днища	Вблизи стенки РВС
	$B_B = 0,37 \cdot R$	по результатам анализа НДС РВС
BS 2654 Eurocode EN 14015	предельная величина осадки определяется проектной организацией	
где $w$ и $B_B$ - максимальная величина осадки, мм и дюйм соответственно; $r, R$ - радиус окружности, вписанной в область неоднородности, мм и фут соответственно.		

Значительный вклад в исследование и разработку методов определения НДС резервуаров, в том числе при неравномерных осадках основания, внесли П. А. Коновалов, В. Б. Галеев, М. К. Сафарян, В. А. Буренин, А. А. Тарасенко, Г. Г. Васильев, Г. Г. Хоперский, И. И. Буслаева, А. С. Горелов, О. П. Коновалова, В. Д. Лебедев, А. Ю. Потапов, П. А. Дегтярев и др. Однако полученные результаты не позволяют оценить НДС металлоконструкций резервуара при неравномерной осадке с достаточной точностью из-за принятых допущений.

**Во второй главе** представлен расчет НДС днища РВС аналитическим методом С. П. Тимошенко. Представлены основные этапы создания численной модели резервуара РВС-20000 в ПК ANSYS. Выполнена верификация разработанной численной модели РВС-20000 с точным аналитическим решением.

Получить решение задачи прогиба днища в нелинейной постановке с достаточной точностью возможно посредством применения численных методов. Так, в работе был использован ПК ANSYS на основе метода конеч-

ных элементов.

В исследованиях И. В. Слепнева, Ю. В. Соболева, А. А. Тарасенко доказано, что при разработке численной модели РВС необходимо стремиться к максимальной детализации конструкции. Отсутствие соединительных элементов конструкций РВС приводит к появлению существенных погрешностей при последующих вычислениях полей деформаций и напряжений. Поэтому для создания модели резервуара РВС-20000, максимально приближенной к реальной конструкции, было выполнено построение следующих конструктивных частей: центральной части днища, окрайки, стенки, кольца жесткости, балочного каркаса и настила крыши. В разработанной модели одновременно были приложены максимальные эксплуатационные нагрузки: вес хранимой жидкости  $P$ , избыточное давление  $P_{изб.}$ , вакуумметрическое давление  $P_{вак.}$ , вес снегового покрова и стационарного оборудования крыши  $P_{сн.+об.}$ . При выборе материала были заданы свойства резервуарной стали 09Г2С с пределом текучести  $\sigma_{тек} = 325$  МПа. В предлагаемой численной модели РВС-20000 была учтена реальная геометрическая форма и размеры конструкции, а также решена контактная задача упругого взаимодействия днища и грунтового основания с локальной неоднородностью. С целью учета пространственной работы грунта была использована модель грунтового основания Пастернака, учитывающая дискретные коэффициенты постели, определяющие деформационные характеристики основания. Для области неоднородности был введен коэффициент постели  $k_1$ , для основания резервуара за пределами области неоднородности –  $k_2$ .

При решении задач деформирования методом конечных элементов основное разрешающее уравнение имеет вид:

$$\{F\} + \{F\}^{\sigma_0} + \{F\}^{\epsilon_0} + \{F\}^g + \{F\}^q = \{U\}[K] \quad (1)$$

где  $[K]$  – матрица жесткости конечного элемента (КЭ);  $\{U\}$  – глобальный вектор узловых перемещений;  $\{F\}$ ,  $\{F\}_\sigma$ ,  $\{F\}_\epsilon$ ,  $\{F\}_g$ ,  $\{F\}_q$  – глобальный вектор внешних узловых сил и векторы узловых сил, соответствующих начальным напряжениям, начальным деформациям, массовым и поверхностным силам соответственно.

При разбиении объекта на конечно-элементную сетку важным этапом является выбор функции формы и типа КЭ, существенно влияющий на точность вычислений. При создании численной модели резервуара для генерирования сетки в центральной части днища, окрайке, стенке, кольце жесткости и листовом настиле крыши был выбран оболочечный четырехузловой КЭ SHELL181; в несущих балках каркаса крыши – линейный двухузловой

балочный КЭ ВЕАМ188; в связующих балках крыши - двухузловой КЭ ВЕАМ4. Для учета физической нелинейности экспериментально полученная кривая «напряжение-деформация» для стали 09Г2С была аппроксимирована зависимостью, состоящей из 4 отрезков: первый отрезок соответствует пределу пропорциональности, второй – пределу текучести, третий – площадке текучести, четвертый – пределу временного сопротивления.

Оценка достоверности разработанной в ПК ANSYS численной модели установлена путем решения верификационной задачи. Для задачи деформирования днища в осесимметричной постановке аналитическим и численным методами были получены зависимости поперечных перемещений (рисунок 2) и напряжений (рисунок 3), действующих в днище, по его длине.

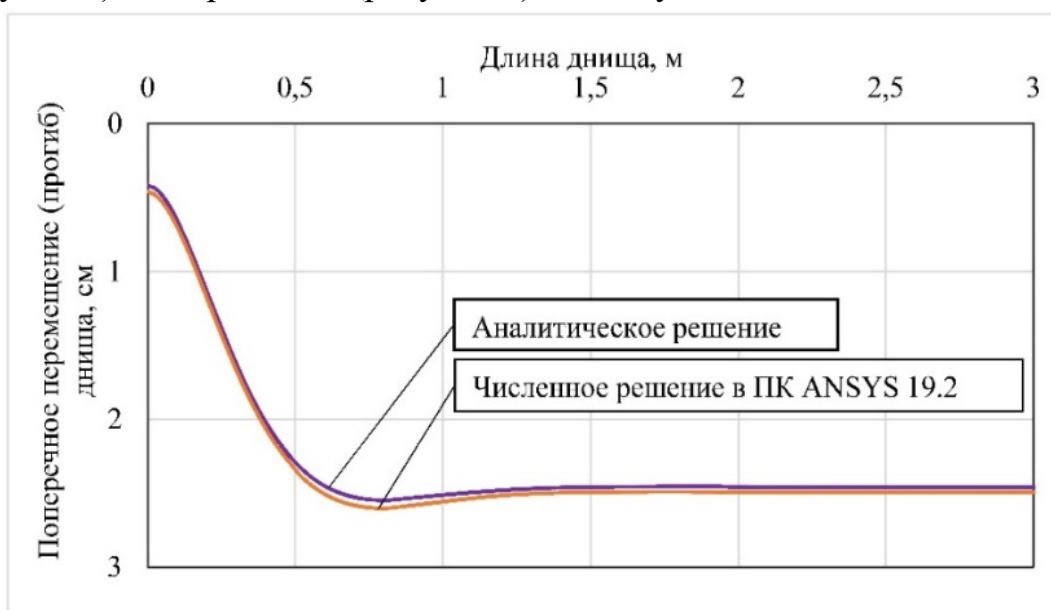


Рисунок 2 - Прогиб днища РВС-20000

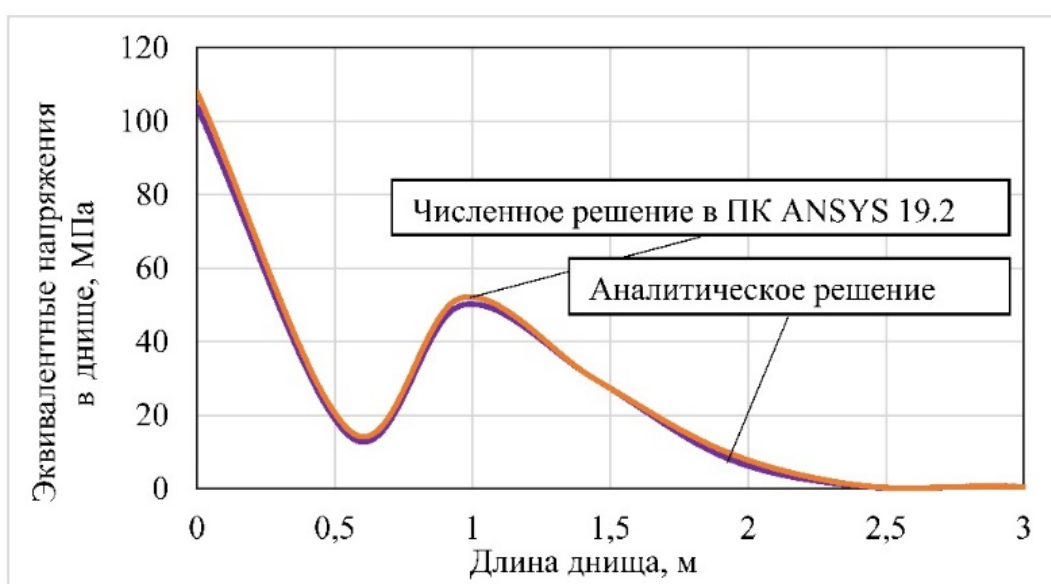
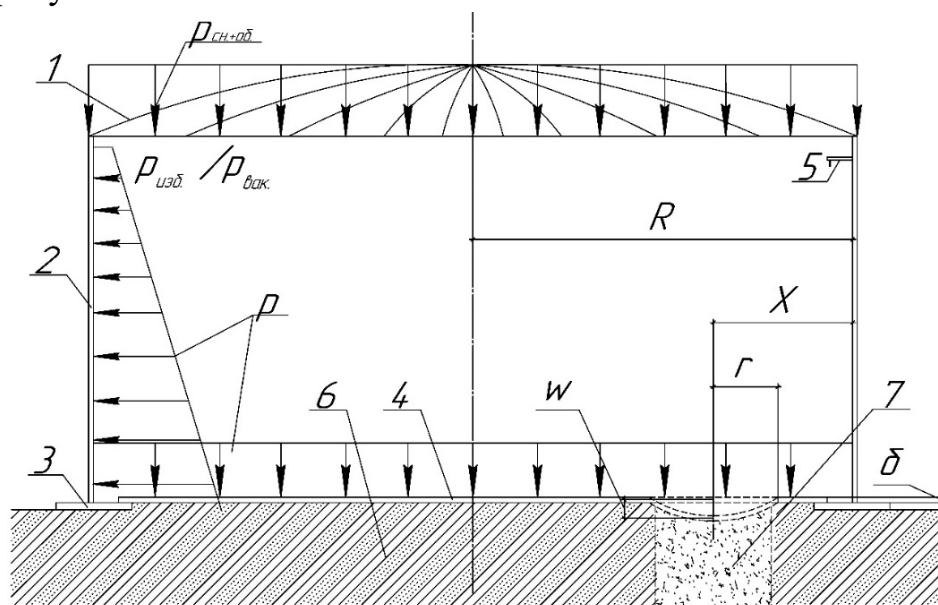


Рисунок 3 - Действующие напряжения в днище РВС-20000

Отличие результатов аналитического и численного расчетов составило не более 3%, что подтвердило достоверность результатов, полученных при расчете КЭ-модели РВС-20000. Таким образом, разработанная численная модель РВС-20000 позволяет определить параметры НДС резервуара при локальной неоднородности основания с достаточной точностью.

В третьей главе выполнено моделирование локальной осадки днища, вызванной областью неоднородности в основании; разработана расчетная схема для проведения численного эксперимента в нелинейной постановке; выполнено планирование численного эксперимента; установлены предельные значения величин осадки днища РВС-20000 при различных параметрах локальной неоднородности без учета краевого эффекта; установлена степень детализации модели РВС, позволяющая определить значения параметров НДС резервуара при неравномерной осадке с достаточной точностью; получены зависимости, позволяющие определять границы зоны краевого эффекта от стенки РВС; установлены зависимости предельных величин локальных осадок днища от радиуса области неоднородности и её положения относительно стенки РВС.

Расчетная схема для проведения численного эксперимента представлена на рисунке 4.



- 1 - крыша, 2 - стенка, 3 - окрайка, 4 - полотнище днища,  
 5 - кольцо жесткости, 6 - грунтовое основание с коэффициентом постели  $k_2$ ,  
 7 - локальная неоднородность основания с коэффициентом постели  $k_1$ ;  
 $R$  - радиус РВС,  $r$  - радиус локальной неоднородности,  
 $X$  - расстояние от стенки до центра локальной неоднородности,  
 $w$  - вертикальная составляющая локальной осадки

Рисунок 4 - Расчетная схема

В НТД при определении допустимой осадки учитывается радиус окружности, вписанной в область неоднородности, поэтому для моделирования неравномерной осадки была создана просадочная зона в основании РВС, имеющая форму окружности.

Область неоднородности характеризуется следующими геометрическими параметрами: радиус –  $r$ , расстояние от стенки до центра области неоднородности -  $X$ . Расчет НДС резервуара производился при следующих значениях радиуса просадочной зоны – 1, 2, 4, 6, 8, 10 м. Выбор такого интервала обусловлен тем, что более чем в 92% случаев резервуары, имеющие локальные осадки днища, попадают в данный диапазон значений. Для моделирования подготовленного искусственно уплотненного основания резервуара за пределами области неоднородности был задан коэффициент постели  $k_2 = 2 \cdot 10^8 \text{ Н/м}^3$ , для области неоднородности коэффициент постели  $k_1$  изменялся в интервале от  $0,3 \text{ МН/м}^3$  до  $5 \text{ МН/м}^3$ .

Изменение деформационных свойств просадочной зоны путем задания различных значений  $k_1$  позволило получить зависимости максимальных напряжений в днище от величины осадки для заданных значений  $r$  при воздействии максимальных эксплуатационных нагрузок (рисунок 5). Расчеты производились для случаев толщины днища 6 и 9 мм, когда центр области неоднородности совпадает с центром днища РВС (без учета краевого эффекта).

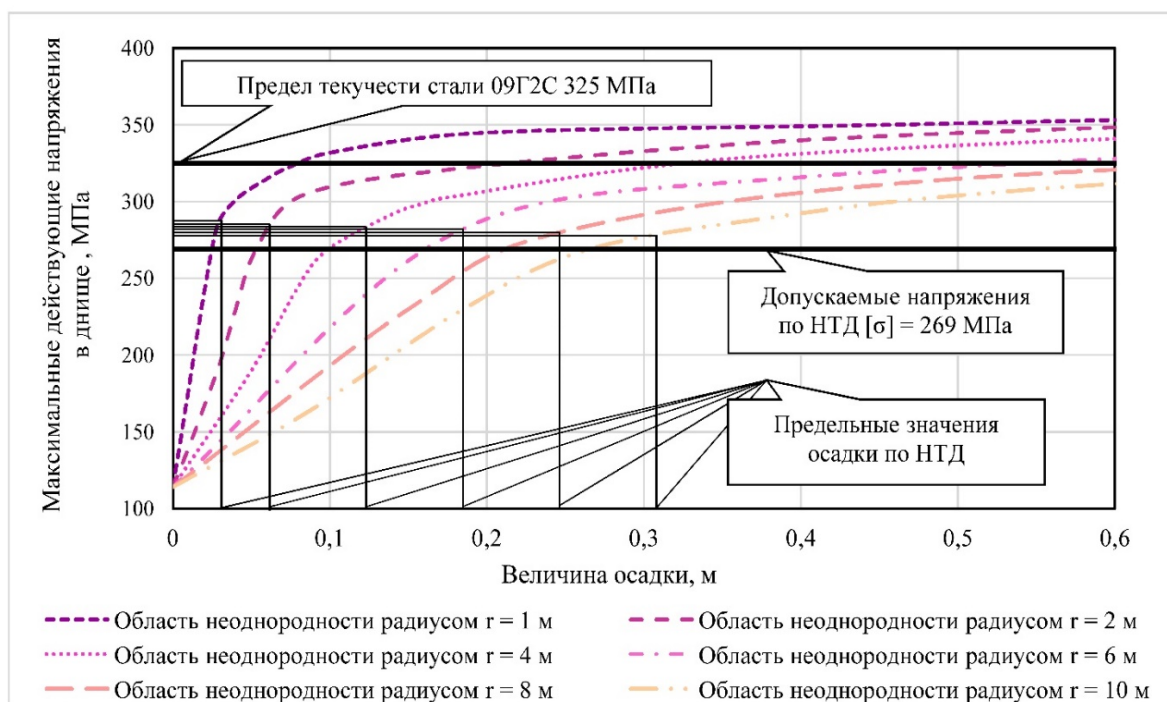


Рисунок 5 - Зависимости максимальных действующих напряжений в полотнище днища от величины локальной осадки при  $\delta = 6 \text{ мм}$

Анализ графических зависимостей показал, что при предельных величинах осадки, регламентированных действующей НТД, максимальные напряжения в днище резервуара толщиной 6 мм превышают допускаемые согласно НТД. В случае толщины днища 9 мм максимально допустимые значения осадки соответствуют регламентированным. По результатам обработки установленных зависимостей было получено выражение (2) для определения максимальной величины локальной осадки в случае толщины полотна днища 6 мм:

$$w = 0,0265 \cdot r \quad (2)$$

Для определения максимальных значений осадки с учетом краевого эффекта было выполнено планирование численного эксперимента. В качестве фактора  $A$  была выбрана степень детализации КЭ-модели:  $A_1$  – КЭ-модель состоит из окрайки, центральной части днища и стенки РВС;  $A_2$  – модель максимально детализирована (дополнительно включает кольцо жесткости и стационарную крышу РВС). Фактор  $B$  – толщина днища (6 и 9 мм для  $B_1$  и  $B_2$  соответственно). Фактор  $C$  – расстояние  $X$  от стенки до центра области неоднородности –  $C_1 = r$ ,  $C_2 = r + 2$  м,  $C_3 = r + 4$  м,  $C_4 = r + 6$  м,  $C_5 = r + 8$  м,  $C_6 = r + 10$  м. Фактор  $D$  – радиус области неоднородности (1, 2, 4, 6, 8, 10 м для  $D_1 \dots D_6$  соответственно). С целью моделирования максимально неблагоприятного случая расчеты производились при предельных значениях осадки.

По результатам расчетов моделей с различной степенью детализации были получены эпюры распределения максимальных напряжений в стенке РВС-20000 (рисунок 6) при различных геометрических размерах и расположениях области неоднородности в основании.

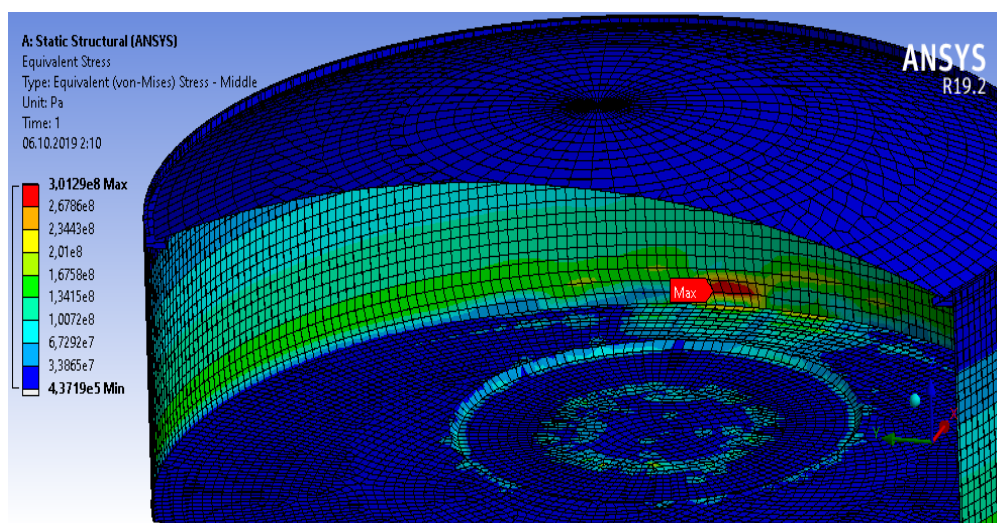


Рисунок 6 - Максимальные эквивалентные напряжения в стенке РВС-20000 при  $\delta = 6$  мм,  $r = 10$  м,  $X = 8$  м (максимально детализированная модель)



Использование модели резервуара РВС-20000 с низкой степенью детализации, не отражающей реальную жесткость сооружения, приводит к снижению точности результатов на 18%. На основании результатов численного эксперимента были установлены зависимости максимальных эквивалентных напряжений в стенке РВС-20000 для заданных радиусов просадочной зоны от положения локальной неоднородности относительно стенки РВС для случая максимально допустимой осадки (рисунок 7).

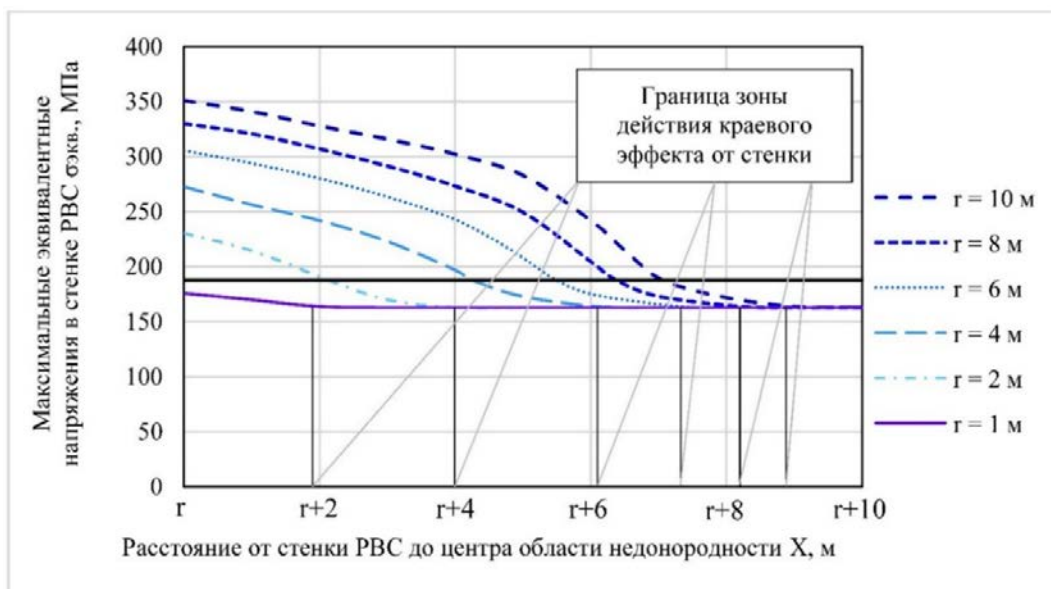


Рисунок 7 - Максимальные эквивалентные напряжения в стенке РВС-20000 при  $\delta = 6$  мм при максимально допустимой осадке

По результатам обработки полученных зависимостей были получены выражения (3) и (4), позволяющие определять границы зоны действия краевого эффекта от стенки РВС, при максимально допустимой осадке для случаев толщины днища 6 и 9 мм соответственно:

$$X = r + 3,0323 \cdot \ln(r) + 1,8956 \quad (3)$$

$$X = r + 3,0085 \cdot \ln(r) + 1,5117 \quad (4)$$

Для определения предельных величин локальных осадок в случае расположения области неоднородности в зоне действия краевого эффекта были установлены зависимости максимальных напряжений в стенке РВС от значений осадки, меньших, чем предельные за границей данной зоны.

Так, на рисунке 8 представлены результаты для локальной области неоднородности радиусом 10 м. Анализ полученных зависимостей позволил установить максимально допустимую величину осадки для интервала радиусов области неоднородности от 1 до 10 м при различных положениях центра просадочной зоны относительно стенки, при которой в металлоконструкциях РВС не наступит предельное состояние.



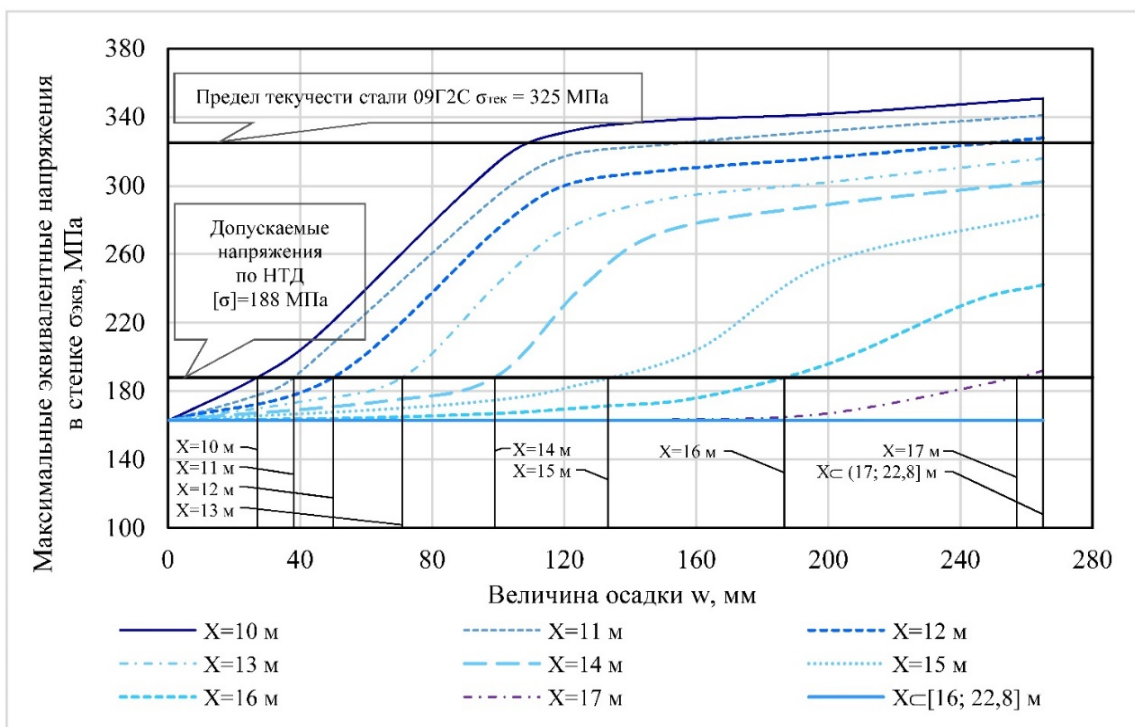


Рисунок 8 – Зависимость максимальных эквивалентных напряжений в стенке РВС-20000 от величины осадки при  $\delta = 6$  мм и  $r = 10$  м

На основе полученных результатов были установлены зависимости максимально допустимых осадок от положения области неоднородности относительно стенки РВС. На рисунке 9 представлены результаты, определенные для днища толщиной 6 мм.

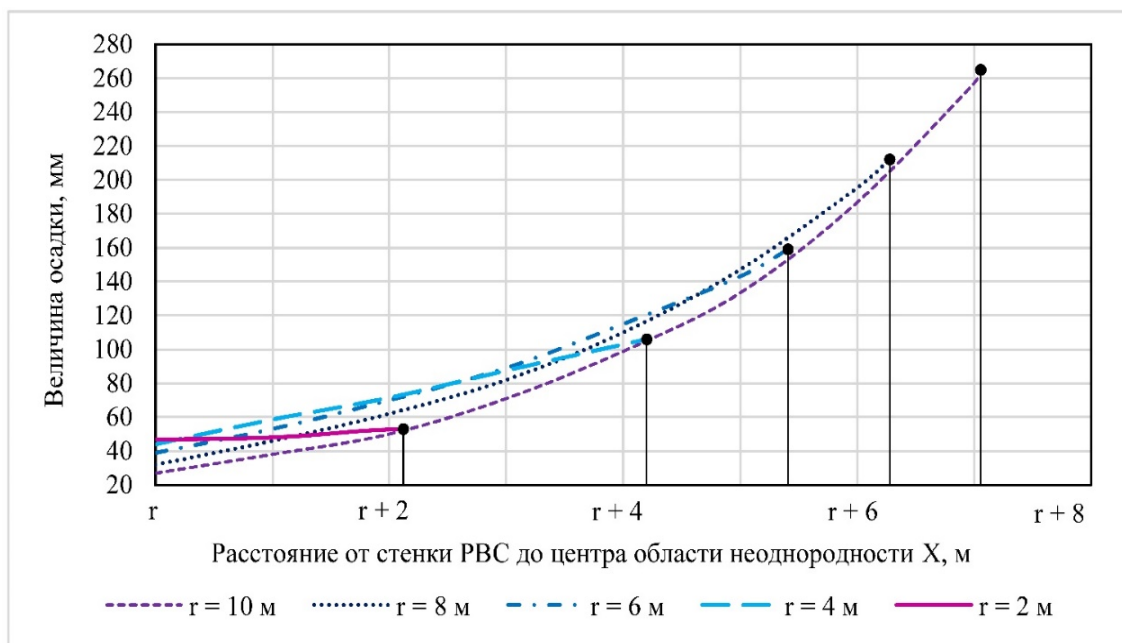


Рисунок 9 - Максимально допустимая величина осадки в зависимости от расположения области неоднородности относительно стенки при  $\delta = 6$  мм

Результаты, полученные в ходе численного эксперимента, стали основой предложенной методики оценки НДС резервуара РВС-20000 при локальной неоднородности грунтового основания и позволили сформулировать предложения по внесению изменений в действующую НТД РФ.

**В четвертой главе** проведен анализ подходов актуальной российской НТД к назначению максимально допустимой величины локальной осадки днища РВС; разработаны алгоритм и методика оценки НДС резервуара РВС-20000 при осадке, вызванной локальной неоднородностью основания; сформулированы предложения по внесению изменений в НТД в части определения максимально допустимых значений локальных осадок днища.

По результатам численного эксперимента было установлено, что при предельных значениях локальных осадок, согласно НТД, и максимальных эксплуатационных нагрузках в полотнище днища толщиной 6 мм возникают напряжения, превышающие допускаемые. Кроме того, установлено, что расположение области локальной неоднородности в окрестностях стенки может привести к возникновению предельного состояния в металлоконструкциях РВС. Однако в отечественной НТД отсутствуют требования к предельным величинам локальных осадок, расположенных вблизи стенки резервуара. Такой подход к определению пределов деформирования днища при локальной осадке не учитывает реальных механизмов формирования НДС РВС при неравномерной осадке. Своевременная и достоверная оценка НДС резервуара при локальных просадках полотнища днища позволит избежать возникновения аварийных ситуаций РВС, а также сократить материальные издержки эксплуатирующих предприятий за счет переноса сроков ремонта.

Так, на основе полученных зависимостей были разработаны алгоритм вынесения решения о целесообразности проведения ремонтных работ (рисунок 10) и методика оценки НДС резервуара РВС-20000 при локальной неоднородности грунтового основания по результатам диагностического обследования конструкции.

На основе анализа исходных данных определяются нагрузки и воздействия на конструкцию РВС, геометрические размеры металлоконструкций РВС-20000. По результатам нивелирования полотнища днища определяется наличие деформаций листов его центральной части. При наличии деформации днища 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 –  $X$ .

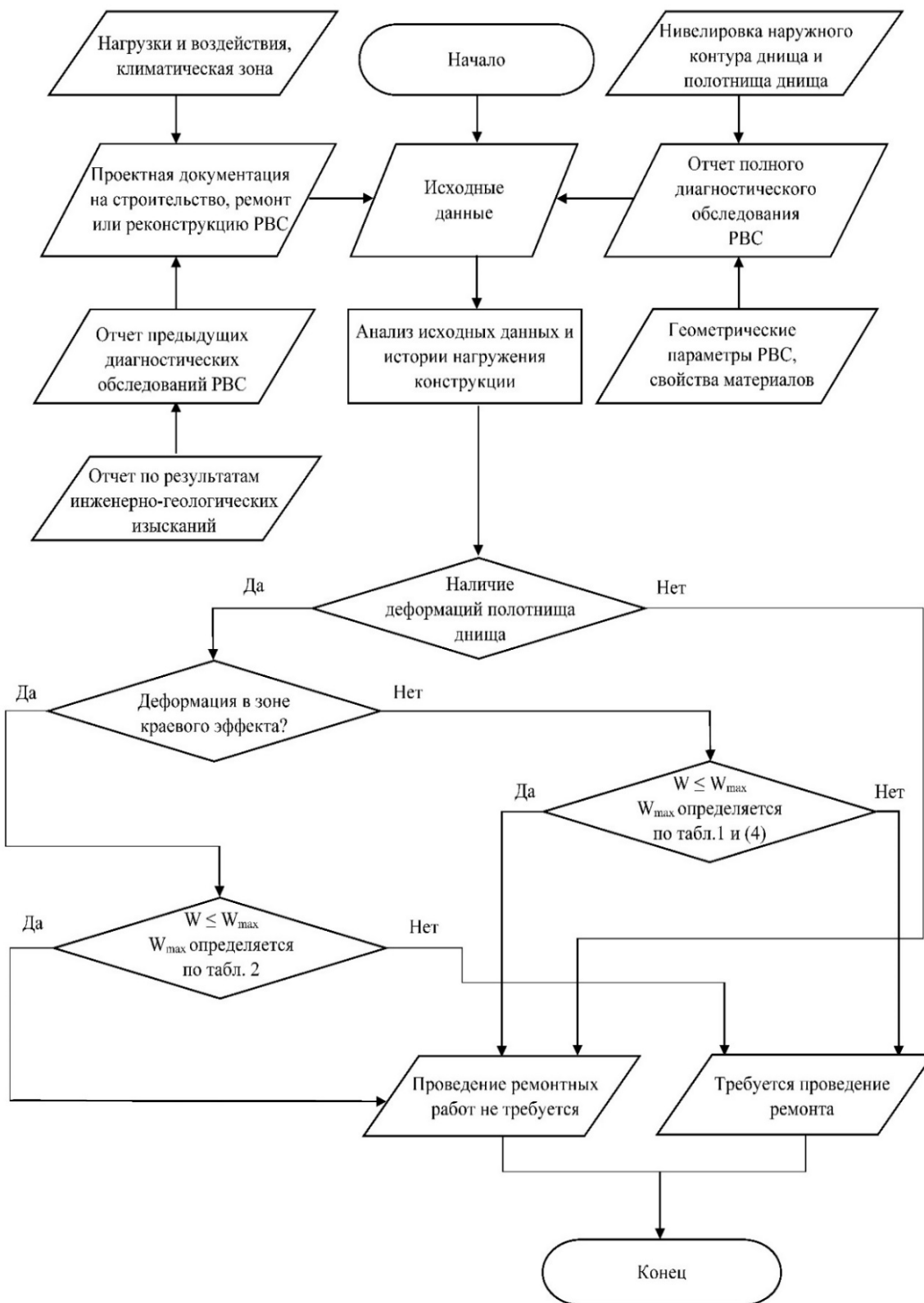


Рисунок 10 - Алгоритм оценки НДС резервуара РВС-20000 при локальной неоднородности грунтового основания

Следующим этапом является проверка выполнения условий:

— для днищ толщиной 6 мм:

$$X \leq r + 3,0399 \cdot \ln(r) \quad (5)$$

— для днищ толщиной 9 мм:

$$X \leq r + 3,0086 \cdot \ln(r) \quad (6)$$

Если условия (5) и (6) выполняются, то центр окружности, вписанной в область локальной осадки, находится в зоне действия краевого эффекта от стенки.

Для оценки НДС резервуара в данных условиях был разработан график определения зон наступления предельного состояния в стенке РВС для случаев днищ толщиной 6 (рисунок 11) и 9 мм.

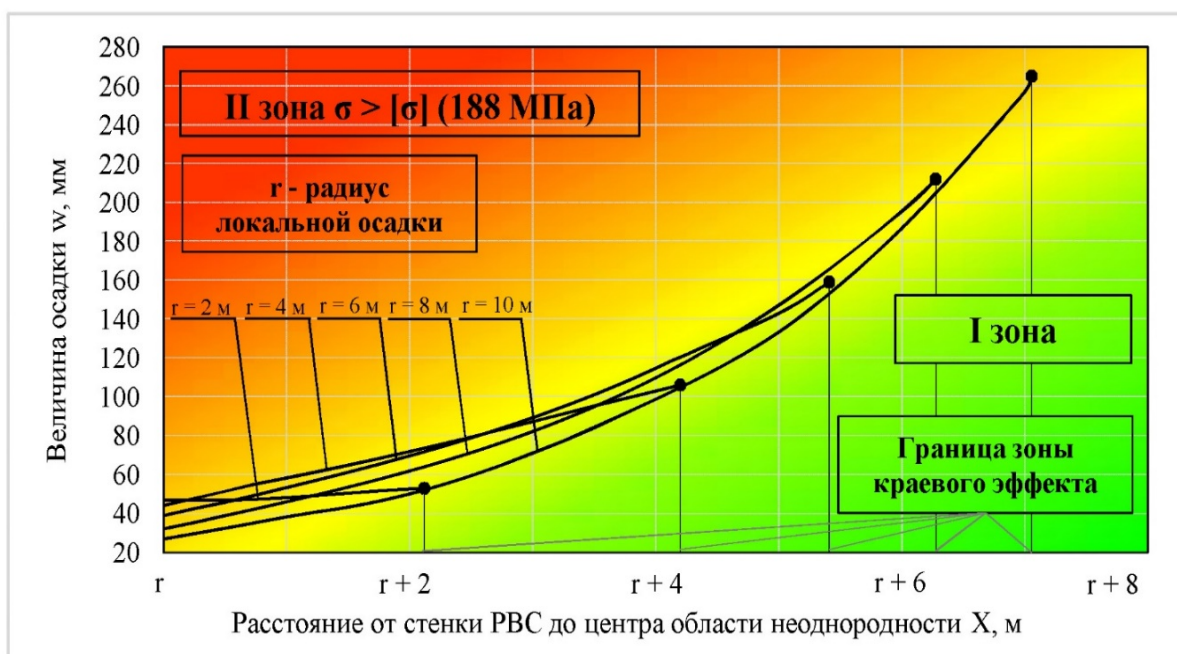


Рисунок 11 - Зоны опасности при расположении центра локальной осадки в зоне действия краевого эффекта при  $\delta = 6$  мм

В случае, если точка пересечения прямой, соответствующей расстоянию от стенки до центра просадочной зоны, и величины осадки попадает во II зону, в стенке возникают напряжения, превышающие допускаемые по НТД. В данных условиях конструкция резервуара находится в аварийном состоянии, и дальнейшая эксплуатация резервуара невозможна.

Если точка пересечения находится в I зоне, в стенке резервуара РВС-20000 предельное состояние не возникнет, проведение ремонтных работ не требуется.

При невыполнении условий (5), (6) оценка НДС резервуара РВС-20000 производится на основе графических зависимостей между действующими напряжениями в днище резервуара и геометрическими параметрами локальной осадки. На рисунке 12 представлен график определения зон наступления предельного состояния в днище толщиной 6 мм.

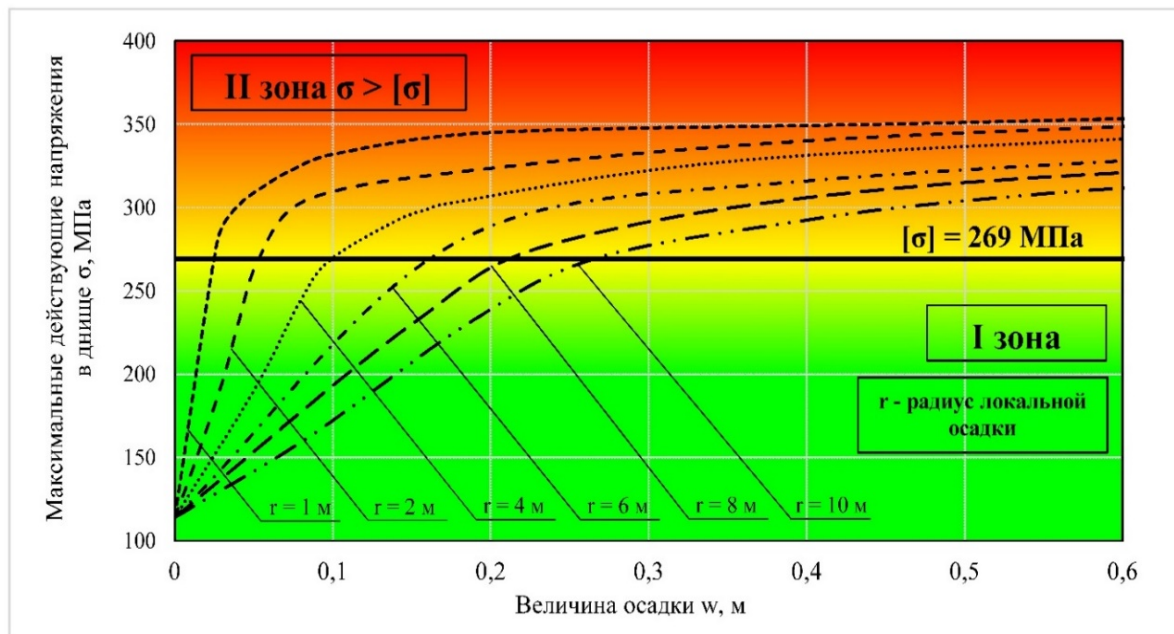


Рисунок 12 - Зоны опасности при расположении центра локальной осадки за пределами зоны краевого эффекта (при  $\delta = 6$  мм)

Согласно полученным зависимостям, в случае, если точка пересечения кривой, соответствующей радиусу просадочной зоны, и величины осадки находится в I зоне, максимальные эквивалентные напряжения в днище не превысят допускаемые, согласно НТД. В границах данной зоны предельное состояние наступить не может. При попадании точки пересечения во II зону в полотнище днища РВС возникают напряжения, превышающие допускаемые. В данном случае требуется проведение ремонтных работ во избежание разрыва полотнища днища.

На основании полученных зависимостей действующих напряжений в металлоконструкциях РВС-20000 от деформационных свойств и геометрических параметров локальной неоднородности были сформулированы предложения по внесению изменений в требования действующей НТД в части назначения предельной величины локальной осадки днища (таблица 2).

Разработанный алгоритм определения НДС РВС-20000 при осадке, вызванной локальной неоднородностью грунтового основания, по результатам диагностики РВС позволяет принимать решение о необходимости ремонта резервуара.

Таблица 2 - Предлагаемые критерии, определяющие предельное значение осадки днища РВС-20000, вызванной областью неоднородности основания

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

Предложенная методика прошла апробацию при диагностике и ремонте резервуара РВС-20000 в 2018-2019 гг. Результаты исследования внедрены в АО «Транснефть-Сибирь».

### 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 допу-

стимых 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 ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

### **Публикации в изданиях из перечня ВАК**

#### **при Министерстве науки и высшего образования РФ:**

1. Грученкова 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.

2. Грученкова 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.

3. Грученкова А. А. Обоснование критериев для предельных осадок резервуара РВС-20000 / А. А. Тарасенко, П. В. Чепур, В. В. Миронов, А. А. Грученкова. - Текст : непосредственный // Известия ВУЗов. Нефть и газ. - 2016. - № 4. - С. 98-103.

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

### Публикации в других изданиях:

5. Грученкова, А. А. Взаимодействие мембраны днища вертикального стального резервуара с грунтовым основанием / А. А. Грученкова, И. В. Антонов, А. Е. Шарков, Е. В. Кузовников, С. С. Соколов. - Текст : непосредственный // Энергосбережение и инновационные технологии в топливно-энергетическом комплексе : сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов, молодых ученых и специалистов. - Тюмень, 2015. - С. 209-212.

6. Грученкова, А. А. Определение деформаций центральной части днища РВС при наличии зон неоднородности грунтового основания / А. А. Тарасенко, П. В. Чепур, А. А. Грученкова. - Текст : непосредственный // Перспективы развития фундаментальных наук : материалы XIII Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. - Томск, 2016. - Т. 6. - С. 43-45.

7. Грученкова, А. А. Исследование развития деформаций крупногабаритного резервуара для хранения нефти при наличии зон неоднородности грунтового основания / А. А. Тарасенко, П. В. Чепур, А. А. Грученкова. - Текст : непосредственный // Актуальные проблемы архитектуры, строительства, энергоэффективности и экологии – 2016 : сборник материалов международной научно-практической конференции. - Тюмень, 2016. - Т. I. - С. 161-166.

8. Gruchenkova A. A. Determining deformations of the central part of a vertical steel tank in the presence of the subsoil base inhomogeneity zones / A. A. Tarasenko, P. V. Chepur, A. A. Gruchenkova. - Direct text // AIP Conference Proceedings. - 2016. - V. 1772. - P. 060011.

9. Gruchenkova A. A. Justification of the necessity to harmonize Russian and international standards concerning the determination of allowable VST Immersion / A. A. Tarasenko, P. V. Chepur, A. A. Gruchenkova, D. A. Tarasenko. - Direct text // AIP Conference Proceedings. - 2017. - V. 1800. - P. 040019.

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



Подписано в печать 19.08.2020. Формат 60×90 1/16. Усл. печ. л. 1,5.  
Тираж 100 экз. Заказ № 1901.

Библиотечно-издательский комплекс  
федерального государственного бюджетного образовательного  
учреждения высшего образования  
«Тюменский индустриальный университет».  
625000, Тюмень, ул. Володарского, 38.

Типография библиотечно-издательского комплекса.  
625039, Тюмень, ул. Киевская, 52.