

Министерство образования и науки
Донецкой Народной Республики
Государственное образовательное учреждение высшего
профессионального образования
«Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»

На правах рукописи



ОЛЕНИЧ ЕЛЕНА НИКОЛАЕВНА

УДК А (043.3)+624.97

О 53

**НЕСУЩАЯ СПОСОБНОСТЬ ДЫМОВЫХ ТРУБ НА ОТТЯЖКАХ
С УЧЁТОМ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ**

2.1.1 – Строительные конструкции, здания и сооружения
диссертация на соискание научной степени кандидата
технических наук

Научный руководитель

ГУБАНОВ Вадим Викторович

доктор технических наук, профессор

Идентичность всех экземпляров диссертации заверяю:

ученый секретарь

диссертационного совета 02.2.001.02



Лахтарина С.В

Макеевка – 2023

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
РАЗДЕЛ I. ОБЩИЕ КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ДЫМОВЫХ ТРУБ, МЕТОДЫ РАСЧЕТА, АНАЛИЗ ПОВРЕЖДЕНИЙ КОНСТРУКЦИЙ	11
1.1 Назначение, область применения, особенности работы и условия эксплуатации	11
1.2 Анализ существующих конструктивных формы металлических дымовых труб	11
1.3 Особенности нагрузок, действующих на дымовые трубы	18
1.4 Развитие методов расчета металлических дымовых труб	21
1.5 Анализ повреждений стальных дымовых труб	26
1.5.1 Допускаемые нормированные отклонения стальных дымовых труб	26
1.5.2 Особенности износа отдельностоящих дымовых труб.....	29
1.5.3 Основы расчета несущей способности металлических конструкций с учётом повреждений	34
1.6 Методы технического обслуживания дымовых труб.....	37
1.7 Выводы по разделу I. Цели и задачи исследования.....	40
РАЗДЕЛ II. РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ПРОВЕДЕНИЯ ЧИСЛЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	43
2.1 Методика статического расчета дымовых труб с двумя уровнями оттяжек	43
2.1.1. Расчет усилий в оттяжках	43
2.1.2 Расчет усилий в стволе дымовой трубы	55
2.1.3 Расчет дымовой трубы с двумя уровнями оттяжек	64
2.2 Особенности построения расчетной модели дымовой трубы в ПК LIRA-SAPR.....	69
2.3 Выводы по разделу II.....	75
РАЗДЕЛ III. НАТУРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СТАЛЬНЫХ ДЫМОВЫХ ТРУБ С ОТТЯЖКАМИ	77
3.1 Методика обследования стальных дымовых труб с оттяжками	77
3.2 Натурные исследования дымовых труб	84
3.3 Выводы по разделу III.....	96

РАЗДЕЛ IV. НЕСУЩАЯ СПОСОБНОСТЬ ОБОЛОЧКИ ДЫМОВЫХ ТРУБ В УСЛОВИЯХ ИЗНОСА	98
4.1 Напряженно-деформированное состояние лацменных узлов дымовых труб.....	99
4.1.1 Влияние изменения толщины кольцевых ребер.....	102
4.1.2 Зависимость изменения толщины ребра крепления оттяжек.....	104
4.1.3 Влияние изменения диаметра оси крепления оттяжки	105
4.2 Исследование лацменных узлов дымовых труб с износом.....	108
4.3. Влияние коррозионного износа на несущую способность стволов дымовых труб с оттяжками.....	114
4.4 Выводы по разделу IV.....	118
РАЗДЕЛ V. НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ДЫМОВЫХ ТРУБ ПРИ ОБСЛУЖИВАНИИ И УСИЛЕНИИ	120
5.1 Эффективность усиления лацменных узлов.....	120
5.2 Исследование напряженно-деформированного состояния дымовых труб при усилении	121
5.2.1 Исследование влияния диаметра оттяжек.....	122
5.2.2 Исследование предварительных напряжений оттяжек	123
5.2.3 Исследование влияния угла наклона оттяжки к горизонтали....	126
5.2.4 Определение конструктивных решений усиления лацменных узлов дымовых труб	128
5.3 Методика оценки несущей способности дымовых труб с оттяжками с учётом износа и технического обслуживания.....	133
5.4 Выводы по разделу V.....	139
ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ.....	140
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	142
ПРИЛОЖЕНИЕ А. (Справка о внедрении).....	164
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.(Справка о внедрении в учебный процесс).....	165
ПРИЛОЖЕНИЕ В. (Результаты натурных исследований стальных дымовых труб с оттяжками).....	166
ПРИЛОЖЕНИЕ Г. (Экономическая эффективность ремонта дымовых труб на оттяжках).....	176

ВВЕДЕНИЕ.

Актуальность темы. Стальные дымовые трубы относятся к специальным высотным сооружениям, широко применяются на котельных промышленных предприятиях и объектах энергетики для создания необходимой тяги и отвода продуктов сгорания. Дымовые трубы работают в сложных условиях перепадов температур, давления, влажности, агрессивного воздействия дымовых газов.

Особенностью дымовых труб на оттяжках является наличие предварительно-напряженных оттяжек, при которых расчетная схема представляет собой консольный сжато-изогнутый стержень с упруго-податливыми опорами в лацменных узлах и жестко заземленного в основании. Благодаря оттяжкам в стволе трубы возникают усилия, распределенные по высоте, максимальные из значений усилий наблюдаются в местах устройства лацменных узлов крепления оттяжек.

В процессе эксплуатации в конструкциях дымовых труб появляются повреждения вследствие агрессивного атмосферного и техногенного воздействия окружающей среды. К таким повреждениям относятся коррозионный износ ствола и элементов узлов, крен ствола, обрыв оттяжек и ослабление предварительного натяжения. Наличие повреждений приводит к повышению уровня действующих усилий и напряжений и, как следствие, к резкому снижению несущей способности и ускоренному выходу сооружения из работы.

В нормативных документах и справочной литературе отсутствует достаточное количество сведений, в которых бы освещались особенности дымовых труб на оттяжках, содержались систематизированные данные и результаты опыта эксплуатации, необходимые для учета действительной работы этих сооружений. На данный момент недостаточно изучено влияние разных типов повреждений на напряженно-деформированное состояние дымовых труб на оттяжках. Учитывая большое количество дымовых труб на оттяжках, находящихся в эксплуатации, исследования в данной области позволят сформировать ряд мероприятий по техническому обслуживанию,

продлению срока службы данных сооружений и повышению качества проектирования.

Связь работы с научными программами, планами, темами.

Диссертационная работа выполнена в рамках кафедральных научно-исследовательских тематик:

– К-2-08-16 «Современные подходы к формообразованию и обеспечению надежности строительных металлоконструкций на основе использования новых информационных технологий в процессе проектирования, изготовления, монтажа и эксплуатации» (2016-2020гг., гос. рег. №0117 D 000263);

– К-2-08-21 «Разработка методов формообразования, расчета и обеспечения надежности зданий и сооружений с металлическим каркасом на основе выполнения численных и экспериментальных исследований» (2021-2025гг., гос. рег. №0121 D 000082)

Степень разработанности темы.

Значительный вклад в развитие методов расчета цилиндрических оболочек внесли авторы В.И. Моссаковский, А.В. Сеченков, В.Г. Выборнов, В.В. Кабанов, В.М. Даревский, Э.И. Григолюк, А.С. Вольмира, J.C. Nagtegaal и др. Работы А.С. Вольмира Ю.Н. Бердникова по исследованию устойчивости цилиндрических оболочек при изгибе опираются на классическое решение линейной задачи потери устойчивости.

Особенности конструктивных решений, методы расчета нагрузок, методы проектирования и эксплуатации дымовых труб посвящены работы М.Б. Солодаря, В.Г. Сатьянова, Ф.П. Дужих, А.М. Ельшина, Р.И. Кинаша. Примеры аналитического расчёта идеальных оболочек металлических дымовых труб с учётом специфики действия ветрового давления приводятся в трудах Е.Н. Лессига, М.Б. Солодаря, W. Schneider, А.К. Escoe. Большой вклад в исследование аэродинамических характеристик ветрового потока для башен с вытяжными трубами внесли авторы А.В. Атаманчук, Д.Д. Чернышев, Р.И. Кинаш и др. Совершенствованные методики расчета металлических дымовых труб были рассмотрены в работах В.В. Губанова, А.В. Голикова, А.Н. Кульчицкого. В работах А.В. Голикова приведены методики расчёта на прочность узла

сопряжения цилиндрической и конической части, узла примыкания газохода дымовых труб. В трудах А.Н. Кульчицкого приведены методики расчета устойчивости оболочек дымовых труб с учетом геометрических несовершенств. Расчетам, проектированию и обслуживанию дымовых труб посвящены конференции и нормы Международной организации промышленных дымовых труб (CICIND).

Общие принципы обслуживания и эксплуатации строительных конструкций рассмотрены в работах М.М. Сахновского, А.И. Лантух-Лященко, А.Г. Ройтмана, А.М. Югова, В.В. Губанова, Ю.М. Ярового, В.А. Банах и др. В этих работах используются две системы технического обслуживания: планово-предупредительные ремонты и ремонты по результатам обследования.

Обзор исследований показывает, что за пределами имеющихся исследований оказались вопросы изменения напряженно-деформированного состояния дымовых труб на оттяжках в процессе эксплуатации.

Цель исследования: уточнение несущей способности стальных дымовых труб на оттяжках с учетом процессов износа и технического обслуживания.

Задачи исследования:

- анализ методов расчета, проектирования и эксплуатации дымовых труб;
- определение количественных и качественных параметров процессов износа дымовых труб;
- исследование влияния повреждений лацменного узла на несущую способность дымовых труб с оттяжками;
- разработка эффективных методов технического обслуживания с учетом их влияния на напряженно-деформированное состояние несущих конструкций.

Объект исследования – стальные дымовые трубы на оттяжках для отвода дымовых газов.

Предмет исследования – изменение напряженно-деформированного состояния дымовых труб на оттяжках в условиях износа и восстановления.

Научная новизна полученных результатов состоит в следующем:

- анализ результата натурных исследований дымовых труб с оттяжками

показал, что основными повреждениями, влияющими на НДС, являются общий коррозионный износ оболочки до 50%, локальный износ лацменного узла до 90%, крен трубы до 1/60 высоты ствола; провисание и обрыв оттяжек;

– уставлено, что износ в лацменных узлах дымовых труб, который состоит в коррозионном износе до 50% сечения кольцевых ребер, приводит к увеличению в них приведенных напряжений в 2 – 2,2 раза. Коррозионный износ до 50% стенки в уровне лацменного узла, а также при совместном провисание оттяжек приводят к изменению приведенных напряжений в пределах 1,4 – 2 раза.

– получены зависимости изменений усилий в оттяжках и напряжений в стволе от высоты трубы, на основании использования которых определены рациональные уровни предварительных натяжений оттяжек (60-100 МПа для 1-го уровня, 102-170 МПа для 2-го уровня) и диаметров оттяжек (25-31 мм).

– усиление лацменного узла накладками позволяет уменьшить приведенные напряжения в стволе трубы в 2 раза. Однако, при натяжении провисающих оттяжек (13-15 МПа для 1-го уровня, 22-25 МПа для 2-го уровня), в кольцевых ребрах лацменного узла наблюдается увеличение приведенных напряжений в 2,8 раза. Определены зависимости напряжений от толщины листа усиления лацменного узла.

Теоретическая и практическая значимость полученных результатов заключатся в следующем:

– разработаны и обоснованы основные положения методики расчета безотказной работы сооружения, учитывающей особенности природно-климатических и технологических нагрузок.

– разработана методика, позволяющая оценить остаточную несущую способность дымовых труб с учётом износа и технического обслуживания.

– разработана методика технического обслуживания дымовых труб на оттяжках, которая включает восстановление оболочки ствола и замену оттяжек.

Методология и методы исследования.

Поставленные в работе задачи решаются с использованием следующих методов:

- методы теоретической и прикладной механики;
- методы численного моделирования с применением метода конечных элементов (МКЭ);
- методы статистической обработки экспериментальных данных натурных исследований конструкций;
- методы численного исследования для анализа влияния износа и усиления на напряженно-деформированное состояние.

Положения, выносимые на защиту:

- методика расчета дымовых труб с оттяжками, учитывающая особенности природно-климатических и технологических нагрузок.
- методика, позволяющая оценить остаточную несущую способность дымовых труб с учётом износа и технического обслуживания.
- методика технического обслуживания дымовых труб на оттяжках, которая включает восстановление оболочки ствола и замену оттяжек.

Внедрение результатов работы.

Результаты исследований были использованы:

- для разработки технической документации по обследованию и оценки остаточного ресурса, дальнейшей эксплуатационной пригодности стальной дымовой трубы на оттяжках $H=20$ м на предприятии ООО «ФИРМА «ПРОМСТРОЙРЕМОНТ», г. Донецк. Работа выполнялась в рамках договора № 0175/6/22 от 07.11.2022 года, по теме «Обследование дымовой трубы $H=20$ м (диаметр 0,7 м)»;
- в учебном процессе в качестве учебного материала по таким дисциплинам: Б1.В.ДВ.08.01 «Металлические конструкции (спецкурс)» (в 7 семестре, объемом 2 з.е.), Б1.В.09 «Обследование зданий и сооружений» (в 8 семестре, объемом 2 з.е.) для направления подготовки 08.03.01 «Строительство», профиль «Промышленное и гражданское строительство»; Б1.В.ДВ.05.01 «Испытание и обследование конструкций зданий и сооружений» (в 1 семестре, объемом 4 з.е.); Б1.В.04 «Расчет и проектирование зданий и сооружений» (во 2 семестре, объемом 3 з.е.); Б1.В.ДВ.04.01 «Расчет и проектирование усиления строительных конструкций» (во 2 семестре, объёмом

3 з.е.) для направления подготовки 08.04.01 «Строительство», программа «Теория и проектирование зданий и сооружений (МК)», что отображено в учебных планах и рабочих программах дисциплин (модулей).

Личный вклад соискателя. Все научные результаты, представленные в диссертационной работе, получены соискателем самостоятельно, а именно:

- сбор и анализ технической литературы по исследованию;
- выбор методов исследований НДС лацменных узлов дымовых труб, разработка конечно-элементных моделей, расчет созданных моделей, обработка и анализ результатов НДС;
- определение значимых факторов влияния повреждений на НДС оболочек стальных дымовых труб;
- разработка численной модели НДС оболочек стальных дымовых труб на оттяжках с учетом износа;
- разработка рекомендаций по оценки несущей способности дымовых труб на оттяжках с учетом износа и технического обслуживания.

Степень достоверности результатов подтверждена данными натурного освидетельствования конструкций, которые выполнены с использованием измерительного оборудования, статистической обработкой данных, а также соответствие численных исследований НДС конструкций с использованием лицензионных программных комплексов.

Апробация диссертационной работы. Основные результаты работы и материалы исследований докладывались и обсуждались на:

- международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы и перспективы развития строительного комплекса» (г. Волгоград, 2019 г.);
- на трех научно-технических конференциях студентов, аспирантов и молодых учёных Донбасской национальной академии строительства и архитектуры (г. Макеевка, 2020-2022 гг.)
- на международной научно-технической конференции к 50-летию ГОУ ВПО «ДонНАСА» «Оптимальное проектирование зданий и сооружений с учетом требований долговечности, надежности и эксплуатации» (г. Макеевка,

2022 г.)

Публикации. Основные положения, результаты и выводы диссертационной работы опубликованы в 6 научных работах, из них 5 включены в международные наукометрические базы, 1 в сборнике докладов тезисов по материалам конференции.

Общий объем публикаций – 3,32 п.л., из которых 1,4 п.л. принадлежат лично автору.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти разделов, выводов, списка использованных источников и 3 приложения. Общий объем диссертационной работы – 177 страниц, в том числе 141 страниц основного текста, 52 полных страницы с рисунками и таблицами, 22 страницы списка использованных источников, 14 страниц приложений.

РАЗДЕЛ I. ОБЩИЕ КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ДЫМОВЫХ ТРУБ, МЕТОДЫ РАСЧЕТА, АНАЛИЗ ПОВРЕЖДЕНИЙ КОНСТРУКЦИЙ

1.1. Назначение, область применения, особенности работы и условия эксплуатации

В зависимости соотношения высоты к размерам поперечного сечения дымовые трубы можно отнести к высотным сооружениям. Назначение промышленных дымовых труб заключается в создании естественной тяги, отвода вредных продуктов сгорания в верхние слои атмосферы и рассеивания их до допустимых концентраций, которые регламентируются действующими санитарными нормами.

По сравнению с типами труб из других материалов они при идентичных параметрах имеют наименьшую массу и наибольший уровень монтажной готовности. Кроме того, стенки стальных дымовых труб не фильтруют конденсат и вредные компоненты отходящих газов, позволяя работать со значительными положительными давлениями и скоростями [56].

Промышленные металлические дымовые трубы зачастую находятся в эксплуатации в среднеагрессивных и сильноагрессивных средах [108]. Дымовые трубы котельных, как правило, эксплуатируются в слабо и среднеагрессивных средах [56, 108].

Температура отходящих газов из котельных агрегатов составляет от 100 до 500°C. При отводе отработанных газов с температурой свыше 300°C по внутренней поверхности устраивают футеровку из огнеупорного шамотного кирпича.

Согласно нормативным документам [51] дымовые трубы относят к сооружениям класса последствий (ответственности) СС2. Ориентировочный срок эксплуатации для дымовых труб $T_{ef} = 30$ лет согласно [51].

1.2. Анализ существующих конструктивных форм стальных дымовых труб

Опыт проектирования металлических дымовых труб показывает наличие различных конструктивных решений сооружения. Это обусловлено выбором

проектировщика, технологическим процессом, условиями строительной площадки [56, 81, 147, 148, 159, 160, 161, 151].

По конструктивным особенностям различают металлические дымовые трубы по следующим признакам:

1. По положению в пространстве делятся на свободностоящие дымовые трубы, раскрепленные оттяжками, дымовые трубы, подкрепленные жесткими подкосами и дымовые трубы в решетчатом каркасе (вытяжные башни). Основные типы дымовых труб представлены на рис. 1.1.

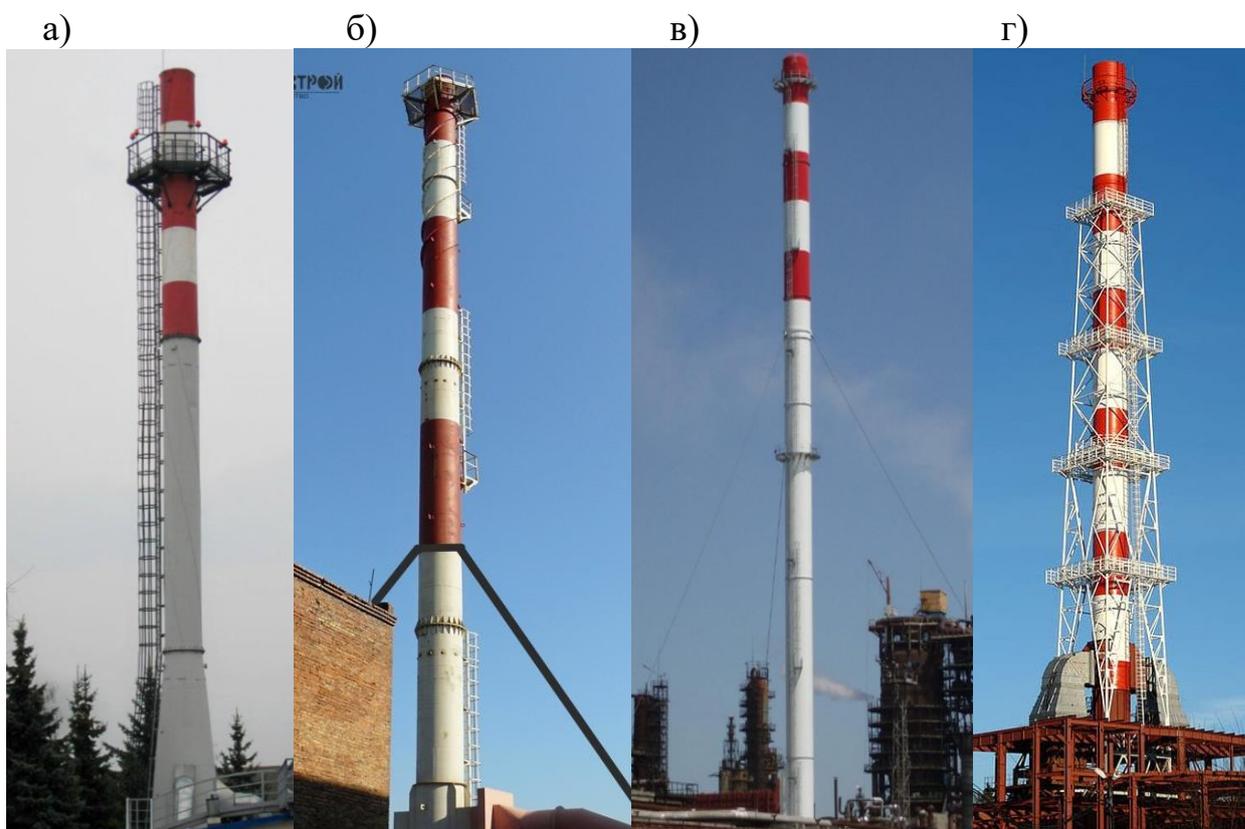


Рисунок 1.1 – Основные типы конструктивных решений дымовых труб:

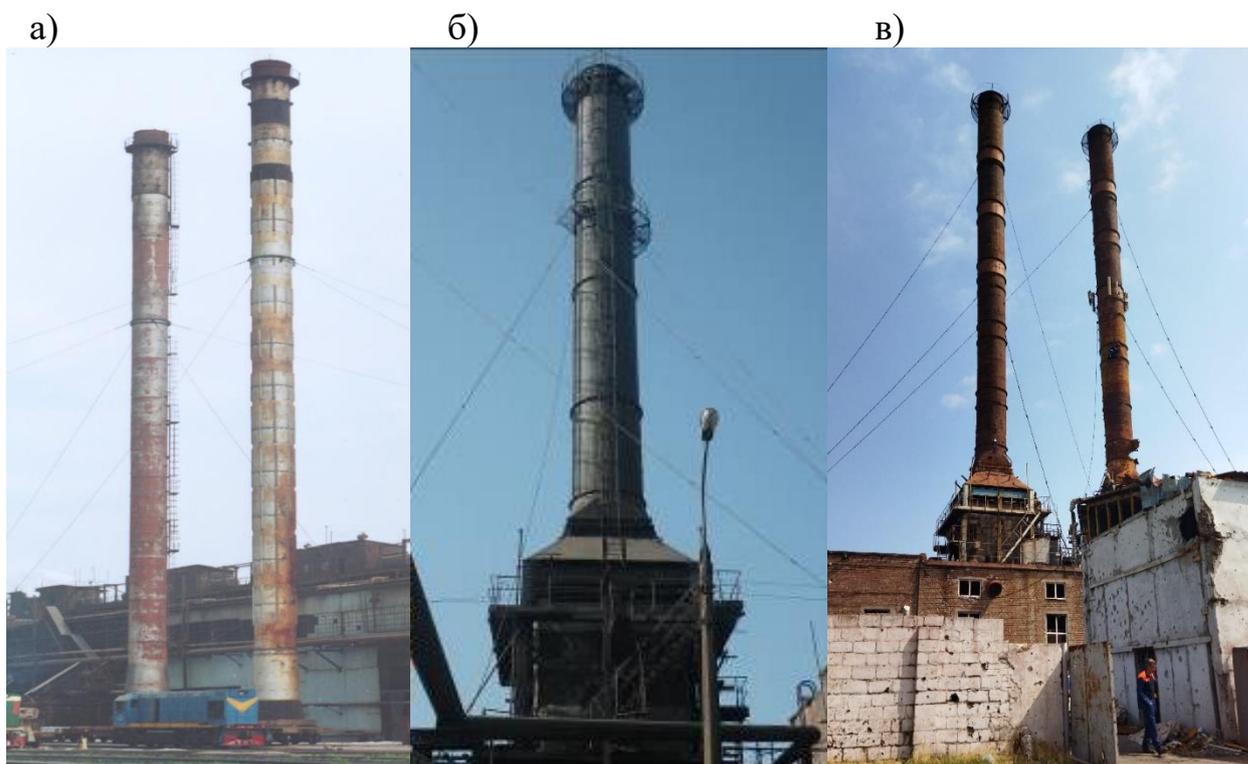
а) свободностоящая труба; б) труба, подкрепленная жесткими подкосами; в) труба, раскрепленная в пространстве оттяжками; г) труба в несущем решетчатом каркасе.

Свободностоящие дымовые трубы сочетают в себе (инженерные) несущие и ограждающие (технологические) функции. Проектируются такие трубы с нижней частью конической, а верхней цилиндрической [109]. Согласно нормативным документам [56, 75] металлические свободностоящие дымовые трубы относятся к высотным сооружениям, в которых наиболее вероятно

возникновение резонансных колебаний. Для снижения резонансных колебаний в таких дымовых трубах применяются специальные устройства, а именно гасители колебаний (динамические, жидкостные) и интерцепторы. Рекомендации по установке интерцепторов и их основные виды приведены в [154, 160].

Металлические трубы на оттяжках, получили широкое применение в качестве труб, отводящих газы котельных установок. Проектируются такие трубы диаметром от 0,4 до 3 м и высотой от 18 до 65 м [109]. В зависимости от высоты трубы дымовые трубы на оттяжках раскрепляются в один или два уровня [55, 109, 110]. Расположение оттяжек по высоте трубы должно приниматься следующим: высота верхней части ствола трубы над оттяжками при одном ярусе оттяжек должна составлять от $1/3$ до $1/4$ общей высоты трубы, при двух ярусах — не более $1/5$; расстояние между ярусами оттяжек должно быть равно $1/3$ высоты трубы [109]. В 80-х годах прошлого века был разработан ряд унифицированных типовых проектов дымовых труб с одной и двумя уровнями оттяжек по высоте [125, 126, 127].

Общий вид дымовых труб с одним и двумя уровнями оттяжек по высоте представлен на рис. 1.2



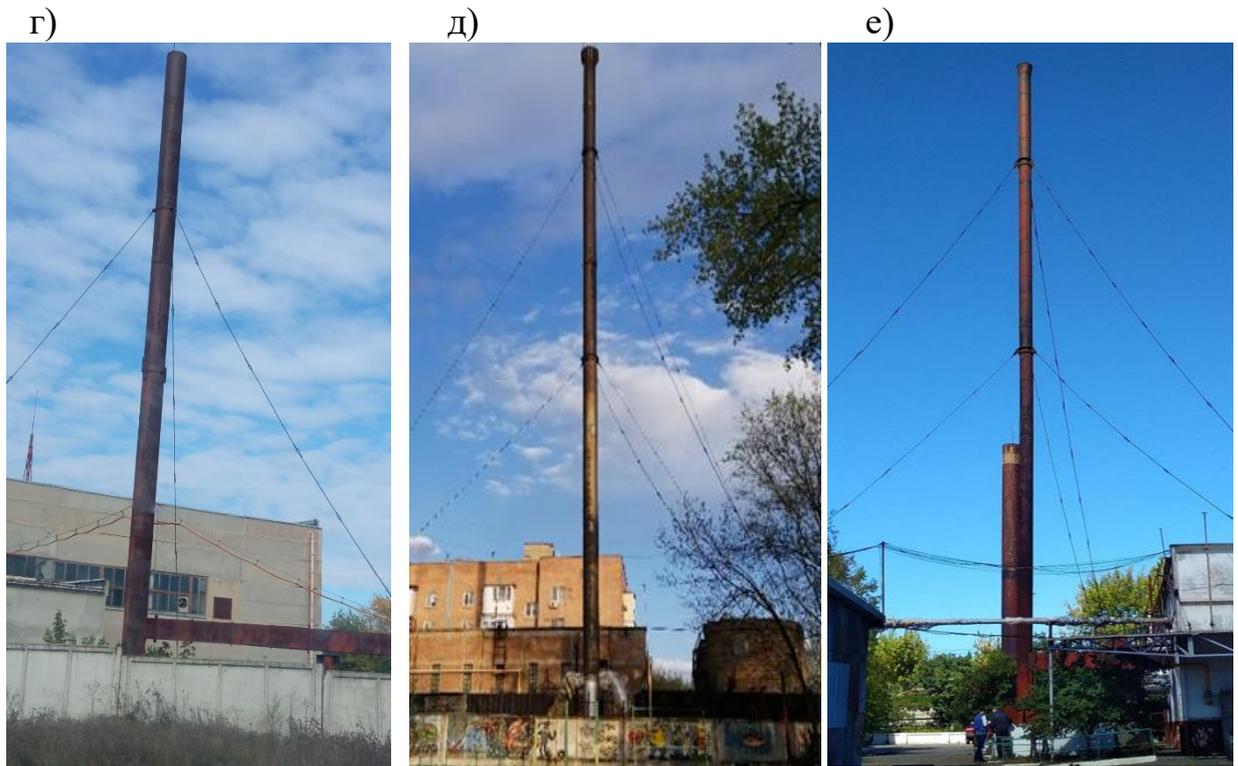


Рисунок 1.2 – Общий вид дымовых труб с оттяжками на промышленных предприятиях (в, б, в) и в городской черте (г, д, е): а, б, г) дымовые трубы с одним уровнем оттяжек; в, д, е) дымовые трубы с двумя уровнями оттяжек.

Металлические дымовые трубы, подкрепленные жесткими подкосами, не получили широкого распространения в отечественной практике промышленного и гражданского строительства.

Металлические трубы в несущем решетчатом каркасе (вытяжные башни) применяются в различных отраслях промышленного и гражданского строительства. В конструкциях таких труб несущие функции выполняет специальный металлический решётчатый каркас. Газоотводящий ствол крепится к решётчатому каркасу, но в случаях, предусмотренных технологическими процессами, может проектироваться опирающимся на фундамент. Поскольку газоотводящий ствол является не несущим элементом, то его толщину принимают около 4-5 мм.

На промышленных предприятиях из общего количества возможных видов конструктивных решений дымовых труб примерно 30% занимают свободностоящие, 50% – дымовые трубы на оттяжках; 20% – дымовые трубы в решётчатом каркасе.

2. По типу примыкания подводящего газохода к дымовой трубе (рис 1.3) может быть надземным (непосредственно в ствол трубы) и подземным (через тело фундамента).

а)



б)



Рисунок 1.3 – Стальные дымовые трубы с подземным (а) и наземным (б) примыканием газохода

3. Футерованные дымовые трубы и дымовые трубы без футеровки.

Футеровка в дымовых трубах предназначена для защиты ствола от температурного и агрессивного воздействия отходящих газов. Опирается футеровка на выступы при уменьшении толщины ствола трубы или на специальные устраиваемые консоли. В качестве футеровки, в основном, применяется огнеупорный шамотный кирпич. Между кожухом трубы и телом футеровки устраивается вентилируемый зазор шириной 20...30 мм.

К основным узлам стальных дымовых труб можно отнести [18, 75]:

- оголовок дымовой трубы;
- монтажные стыки секций трубы;
- узел соединения цилиндрической и конической части дымовой трубы;
- узел примыкания опорного ребра футеровки к стволу;
- узел сопряжения дымовой трубы с фундаментом;

– узел крепления оттяжек (лацменный узел для труб с оттяжками).

Исследованию узлов стальных дымовых труб посвящены работы В.В. Губанова [31, 32, 38, 40], А.В. Голикова [12, 40], А.Н. Кульчицкого [34]. В работах А.В. Голикова [12, 32, 38, 40] исследовались участки, испытывающие влияние краевого эффекта, а именно участок примыкания опорного ребра футеровки к стволу, участок сопряжения цилиндрической и конической части, узла примыкания газохода дымовых труб.

Узел крепления дымовой трубы с фундаментом относится к контактным задачам. В работе данный узел не рассматривается.

Самым ответственным участком в стальных дымовых трубах на оттяжках является участок крепления оттяжек (лацменный узел).

Узел крепления оттяжек является узлом опирания с локальным приложением нагрузок. Усилие в оттяжке передается на дымовую трубу через фасонку, подкрепленную горизонтальными ребрами жесткости (рис.1.4). Виды лацменных узлов стальных дымовых труб представлены на рис.1.5

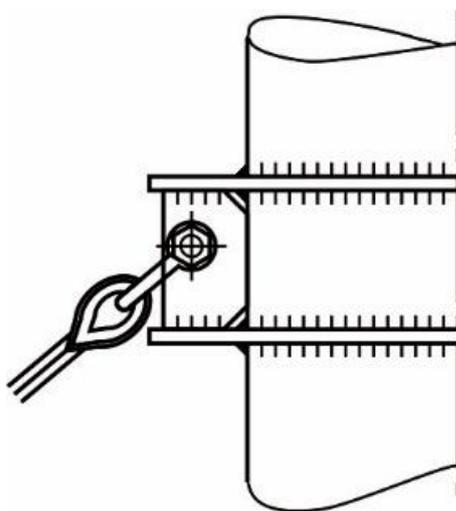


Рисунок 1.4 – Узел крепления оттяжки к стволу трубы



Рисунок 1.5 – Виды лацменных узлов дымовых труб на оттяжках

Существует два варианта подкрепления ствола дымовой трубы оттяжками в плане: три и четыре оттяжки в узле (рис. 1.6, 1.7).

В литературных источниках [101, 113] при расчете высотных сооружений предлагается рассматривать 3 направления ветра для дымовых труб с тремя оттяжками в узле и 2 направления ветра для четырех оттяжек.

На рисунках 1.6, 1.7 показаны основные направления ветровой нагрузки для расчета дымовых труб с тремя и четырьмя оттяжками в узле. Направление ветра соответствует положительному направлению оси y .

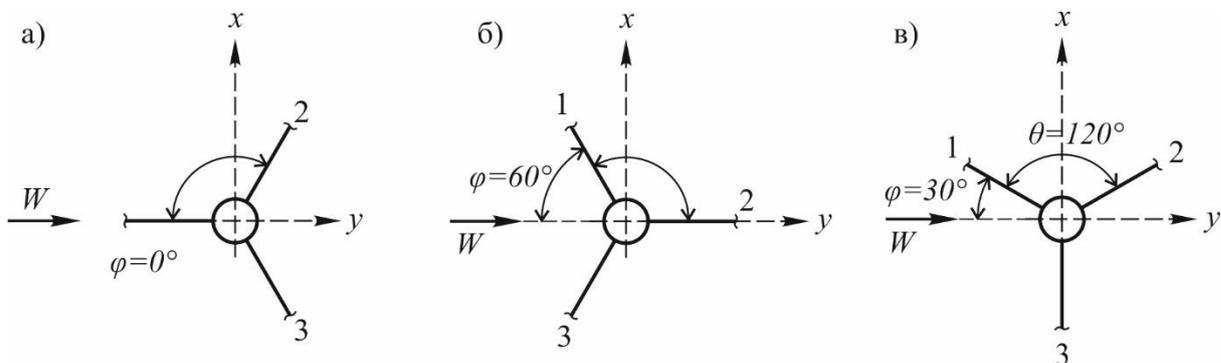


Рисунок 1.6 – Схемы ветровых нагрузок при 3 оттяжках в узле: а) ветер в плоскости оттяжки; б) ветер по биссектрисе угла между оттяжками; в) ветер перпендикулярно плоскости оттяжки.

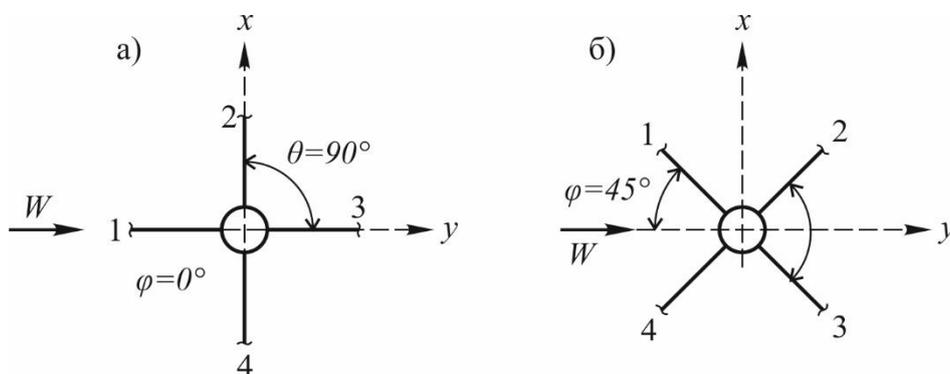


Рисунок 1.7 – Схемы ветровых нагрузок при 4 оттяжках в узле: а) ветер в плоскости оттяжки; б) ветер по биссектрисе угла между оттяжками.

1.3 Особенности нагрузок, действующих на дымовые трубы

Исследованиям действия ветра на высотные сооружения посвящены работы Г.О. Савицкого [100], С.Ф. Пичугина [94, 95, 96], А.В. Махинько [72], М.Ф. Барштейна [54], Э. Симмиу [105], А.Г. Davenport [165], а исследованиям работы высотных сооружений под действиями динамических нагрузок посвящены работы Б.Г. Корнеева [63], М.И. Казакевича-[58], В.В. Кулябко [67, 38], R.W. Clough [153]. Результаты проведенных исследований привели к разработке различных методов для определения скорости ветра с определенным периодом повторяемости, районирования территории в зависимости от ветрового напора, учета топографических факторов, определения параметров увеличения ветрового напора по высоте, а также оценки влияния формы

сооружения и других факторов. Важно отметить, что основные параметры норм, установленных в разных странах мира, значительно различаются между собой.

Значительный вклад в изучение аэродинамических характеристик ветрового потока для башен с вытяжными трубами внесли следующие авторы: А.В. Атаманчук [2, 3], Д.Д. Чернышев [129, 130, 131], И.С. Холопов [3, 129], Р.И. Кинаш [60, 61]. Экспериментальные исследования показали, что при близком расположении цилиндров и определенных углах атаки значительно возрастает значение аэродинамического коэффициента. Для аппроксимации этого коэффициента использовался полином четвертой степени, зависящий от угла атаки, и максимальные значения для трех труб составили 1,2-1,4.

Металлические дымовые трубы, классифицируемые как высотные сооружения, подвержены различным видам нагрузок, согласно источникам [156, 50, 55, 115], которые можно разделить на постоянные и временные.

Постоянные нагрузки включают собственный вес сооружения, вес футеровки и дополнительного оборудования.

Временные нагрузки включают воздействие ветра, температурные воздействия, гололедное воздействие, а также специальные виды воздействий, такие как сейсмические, аварийные и химические воздействия.

Указанные выше нагрузки имеют решающее значение для обеспечения прочности и устойчивости сооружения. Однако, опыт и современные исследования [40, 43, 33, 35, 36, 39, 55] показывают, что в расчетах необходимо учитывать следующие факторы:

- неравномерное оседание фундамента, которое приводит к появлению дополнительных моментов от собственного веса сооружения;
- отклонение оси сооружения от проектного положения (за рубежом ограничивается уклоном 1,5-2%);
- геометрические несовершенства формы дымовой трубы (любые дефекты и повреждения в конструкции вызывают дополнительные усилия).
- инсоляция (неравномерное нагревание дымовой трубы солнечными лучами).

Ветровая нагрузка является основной временной нагрузкой, которая

влияет на дымовые трубы и в значительной степени зависит от скорости ветра в районе строительства. Ветровая нагрузка на дымовые трубы состоит из нескольких компонентов:

- продольная средняя составляющая;
- продольная динамическая составляющая, включающая квазистатическую и резонансную составляющие;
- поперечная ветровая нагрузка, вызванная аэродинамической неустойчивостью.

Кроме того, стоит отметить, что дымовые трубы подвержены воздействию различных аэроупругих эффектов, которые вызывают поперечные колебания.

Для оценки воздействия ветрового давления на дымовые трубы применяются соответствующие нормативы и методики расчета. В Украине, в частности, расчет ветрового давления осуществляется в соответствии с ДБН В.1.2-2:2006 «Нагрузки и воздействия» [50]. В этих нормах учитывается динамическое воздействие ветровой нагрузки с помощью коэффициента динамичности, который принимает значения в диапазоне от 0,95 до 1,2. Однако, в [50] не содержится конкретная методика учета ветрового резонанса, хотя в современной технической литературе [54, 72, 96] отмечается его важность и необходимость учета.

По методике, изложенной как в отечественных нормативных документах [115], так и в нормах Eurocode 3 [157] для расчета пульсационной составляющей ветровой нагрузки на дымовые трубы необходимо определить частоты собственных колебаний. Выбор способа расчета нормативного значения пульсационной составляющей ветровой нагрузки и коэффициентов динамичности зависит от частоты собственных колебаний по первым двум формам.

Фундаментальной работой в области ветровых нагрузок на здания и сооружения является книга Э. Симиу и Р. Сканлана [105]. В этой книге представлены примеры зависимости ветровой нагрузки от скорости ветра при воздействии на здания и сооружения.

Для динамических расчетов высотных сооружений важным показателем является логарифмический декремент затухания колебаний. Он определяется как натуральный логарифм отношения двух последовательных амплитуд колебаний в одном направлении. Согласно различным нормам проектирования [148, 152], сравнение значений логарифмического декремента показывает, что он обычно варьируется в диапазоне от 0,002 до 0,006.

1.4. Развитие методов расчета металлических дымовых труб.

С начала 1960-х годов было проведено значительное количество экспериментальных исследований, направленных на понимание деформационного поведения и критического состояния цилиндрических оболочек при различных воздействиях, таких как осевая нагрузка, внутреннее и внешнее давление, а также комбинация нагрузок. Ученые, такие как В.И. Моссаковский [79], А.В. Саченков, В.Г. Выборнов [102, 103], М.В. Никулин [82], Ю.Г. Коноплев [62], В.В. Кабанов [23], В.М. Даревский [47, 48], провели исследования критического поведения цилиндрических оболочек при локальных воздействиях. В своих работах они использовали данные, накопленные предыдущими исследователями, что позволило установить вероятностные характеристики несущей способности цилиндрических оболочек.

Большой вклад в развитие теории расчета тонкостенных цилиндрических оболочек был сделан Э.И. Григолюком, В.В. Кабановым [23], В.В. Новожиловым [83, 84], В.С. Гудрамовичем [45, 46]. Работы А.С. Вольмира [10, 11] и Ю.Н. Бердникова [7] по изучению устойчивости цилиндрических оболочек при изгибе основываются на классическом решении линейной задачи потери устойчивости с предположением, что оболочка теряет устойчивость за пределами упругости из-за появления вмятин в сжатой зоне. Для определения критических напряжений авторы используют численные методы.

Следующим этапом в развитии теории прочности и устойчивости цилиндрических оболочек, начиная с 70-х годов 20-го столетия, стало широкое применение метода конечных элементов. Важный вклад в становление и развитие этого метода внесли исследования А.К. Шалабанова [132], В.В.

Кабанова [23], В.Г. Баженова [124], И.Ф. Образцова [86], D. Chapelle и К.Ж. Bathe [150], J.C. Nagtegaal [162], J. Barlow [149].

В трудах Е.Н. Лессига и А.Ф. Лилеева [70], М.Б. Солодаря [114], В.В. Горева [75], W. Schneider [163, 164], А.К. Escoe [155] представлены примеры аналитического расчета идеальных оболочек металлических дымовых труб и газоотводящих стволов с учетом специфики действия ветрового давления.

Особенности конструктивных решений, методы расчета нагрузок, методы проектирования и эксплуатации дымовых труб посвящены работы М.Б. Солодаря [114], В.Г. Сатьянова [78], Ф.П. Дужих [55], А.М. Ельшина [56], Р.И. Кинаша [60, 61].

Общие подходы к методам расчета и проектирования дымовых труб, а также особенности их конструктивных решений описаны в работах таких авторов, как М.Б. Солодарь [114], В.Г. Сатьянов [78], Ф.П. Дужих [55], А.М. Ельшин [56], Р.И. Кинаш [60, 61].

Совершенствованные методики расчета металлических дымовых труб были рассмотрены в работах В.В. Губанова [28,30,31,37,38 40, 41], А.В. Голикова [9, 12, 26,32,34,37,38,40], А.Н. Кульчицкого [30, 34]. В работах А.В. Голикова [12] приведены методики расчёта на прочность узла сопряжения цилиндрической и конической части, узла примыкания газохода дымовых труб. В трудах А.Н. Кульчицкого [30, 34] приведены методики расчета оболочек дымовых труб на основании распределения местных напряжений на участках с геометрическими отклонениями.

Дымовые трубы рассчитываются в виде консольных сжато-изогнутых стержней, жестко заземленных в основании, в соответствии нормативным документам [50, 52] и справочной литературе [56, 75]. Представленные методики расчета основаны на определении нормальных меридиональных σ_z и кольцевых напряжений σ_φ . Однако, ряд изученных работы [25, 27, 30, 33,38, 40, 43, 158] говорит о недостатке, особенно при проведении проверочных расчётов на стадии эксплуатации, когда имеются отклонения оболочки от идеального цилиндра в виде вогнутостей/выпуклостей, прогаров, стыковки царг с эксцентриситетом, эллипсности царг.

Для расчета промышленных дымовых труб используют методы теории оболочек, так как сооружение является тонколистовой цилиндрической оболочкой.

Согласно нормативным документам [117] при проектировании металлических труб необходимо выполнение следующих расчетов:

- по несущей способности;
- общей устойчивости ствола;
- местной устойчивости ствола;
- усталости элементов стальных конструкций;
- деформациям ствола.

Расчет по несущей способности следует выполнять с целью подтверждения отсутствия потери устойчивости оболочки в результате действия расчетных нагрузок. Необходимо выполнять проверку оболочки на прочность, а также на общую и местную устойчивость.

Расчет по деформациям выполняется с целью определения величины горизонтального перемещения верха дымовой трубы, от действия нагрузок. Предельное значение горизонтального перемещения верха от нормативной ветровой нагрузки принимается по [116], при этом для каждого конкретного сооружения должны быть учтены следующие требования:

- технологические (обеспечение условий нормальной эксплуатации подъемно-транспортного оборудования, контрольно-измерительных приборов и т.д.);
- конструктивные (обеспечение целостности футеровки, тепловой изоляции, примыкающих друг к другу элементов конструкций и их стыков);
- эстетико-психологические (обеспечение благоприятных впечатлений от внешнего вида сооружения, предотвращения ощущения опасности).

Согласно Еврокоду по расчету оболочек [157], необходимо рассматривать четыре предельных состояния несущей способности металлических оболочек:

- LS1 – предел текучести.
- LS2 – циклическая пластичность.

- LS3 – общая потеря устойчивости.
- LS4 – усталость

Расчет тонких цилиндрических оболочек на прочность в настоящее время разработан достаточно полно [70, 75, 114, 118]. Этот расчет производится по геометрически линейной расчетной схеме в предположении работы материала конструкций только в упругой стадии.

При воздействии на газоотводящий ствол расчетных нагрузок в его стенках в кольцевом и в продольном направлениях возникают растягивающие или сжимающие усилия, изгибающие моменты и перерезывающие силы (рис. 1.9).

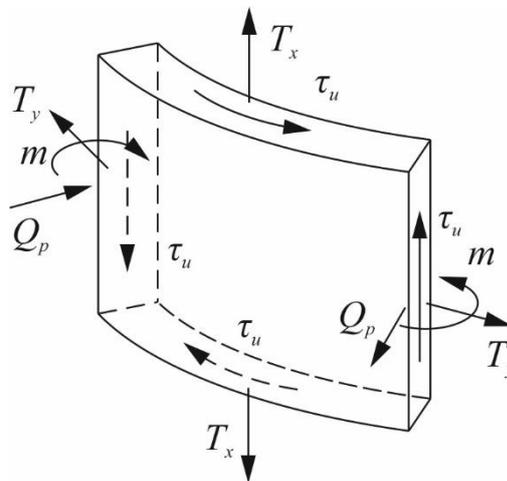


Рисунок 1.9 – Внутренние усилия в участке цилиндрической оболочки

Меридиональное усилие T_x определяется как для сжато-изогнутого стержня кольцевого сечения, подверженного действию продольной силы N и изгибающего момента M [75]:

$$T_x = \frac{N \cdot t}{A} \pm \frac{M \cdot t}{W} \quad (1.9)$$

где A – площадь сечения ствола;

W – момент сопротивления сечения ствола;

t – толщина стенки ствола.

Для определения кольцевых усилий с необходимой степенью точности аэродинамический коэффициент может быть представлен в виде следующего пятичленного ряда [75]:

$$C(\alpha) = Z_0 + Z_1 \cos \alpha + Z_2 \cos 2\alpha + Z_3 \cos 3\alpha + Z_4 \cos 4\alpha \quad (1.10)$$

Для стволов с отношением $H / D \geq 25$ коэффициенты Z_n представлены в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Значения коэффициентов Z_n

Z_0	Z_1	Z_2	Z_3	Z_4
-0,958	0,327	1,322	0,599	-0,208

Кольцевые усилия в оболочке, зависящие от членов ряда (за исключением второго) [75]:

$$T_y = -q \cdot r \cdot Z_0, \quad (1.11)$$

$$m = -q \cdot r^2 \cdot \sum_{n=2}^{n=4} \frac{Z_n}{n^2 - 1} \cdot \cos n\alpha, \quad (1.12)$$

$$Q_p = q \cdot r \cdot \sum_{n=2}^{n=4} \frac{Z_n}{n^2 - 1} \cdot \sin n\alpha, \quad (1.13)$$

где q – расчетное давление ветра на единицу площади без учета аэродинамического коэффициента;

r – радиус срединной поверхности оболочки;

α – угол отсчитываемый от оси направления ветрового потока.

Прочность ствола определяют по приведенным напряжениям [75]

$$\sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x \sigma_y + 3 \cdot \tau_{xy}^2} \leq R_y \cdot \gamma_c, \quad (1.14)$$

$$\text{где } \sigma_x = T_x / t, \quad \sigma_y = T_y / t \pm 6m / t^2, \quad (1.15)$$

$$\tau_{xy} = \sqrt{\tau_u^2 + \tau_p^2}, \quad \tau_u = Q \cdot S / (I \cdot t), \quad \tau_p = (3/2) \cdot (Q_p / t). \quad (1.16)$$

В местах расположения кольцевых ребер жесткости возникают дополнительные напряжения краевого эффекта. Определение этих напряжений подробно изложено в нормативной литературе [75].

Безмоментное напряженное состояние оболочек вращения описывается уравнением Лапласа

$$\frac{N_1}{R_1} + \frac{N_2}{R_2} - p = 0 \quad (1.17)$$

где N_1 , N_2 – соответственно меридиональное и кольцевое усилия;

p – нормальная составляющая внешней нагрузки.

Меридиональное и кольцевое усилие определяется по формулам

$$N_1 = pR_2 / 2, \quad N_2 = N_1(2 - R_2 / R_1) \quad (1.18)$$

Для определения меридиональных и кольцевых усилий в цилиндрических оболочках подставим неравенства (1.18) радиусы кривизны. Тогда напряжения при толщине t будут равны:

$$\sigma_1 = pr / (2t); \quad \sigma_2 = pr / 2t \quad (1.19)$$

1.5 Анализ повреждений стальных дымовых труб

1.5.1 Допускаемые нормированные отклонения стальных дымовых труб

На основании рассмотренной отечественной [70, 114] и зарубежной технической литературе по листовым конструкциям [156] можно выделить следующие дефекты и повреждения:

– дефекты – отклонения фактической формы и размеров конструкции, их материалов и элементов от нормативных требований при проектировании, вызванные особенностями изготовления, транспортировки и монтажа:

- эксцентриситеты стыковки царг оболочки трубы;
- вмятины в оболочке;
- депланация (искривление) оболочки в зоне сварного шва;
- некруглость (эллиптичность или, в общем, некруглость) оболочки.

– повреждения – изменения геометрической формы и свойств материала, возникающие в процессе эксплуатации:

- прогары в локальной зоне оболочек;
- равномерный и неравномерный по высоте и сечению коррозионный износ;
- локальное искривление оболочки вследствие потери устойчивости на отдельных участках.

Таблица 1.2 – Допускаемые отклонения от проектных линейных размеров согласно требованиям отечественных норм

Наименование	Параметр	Допускаемое отклонение
Длина и ширина	до 1,5 м	0,5 мм
	от 1,5 м до 2,5 м	1,0 мм
	от 2,5 м до 4,5 м	1,5 мм

В процессе изготовления тонколистовых конструкций, и в частности, оболочек дымовых труб, геометрические размеры дефектов и повреждений, зачастую, превышают предельные значения, которые регламентируют нормативные документы [110, 112].

Допускаемые отклонения от проектных линейных размеров согласно нормативного документа [112], регламентирующий правила производства и приемки работ следующие:

1. Искривление деталей

– зазор между листом и стальной линейкой длиной 1 м (в меридиональном направлении) – 1,5 мм;

2. Отклонение при гибке

– просвет между шаблоном и поверхностью свальцованного листа в холодном состоянии – 2 мм;

– эллиптичность (разность диаметров) окружности в листовых конструкциях:

- вне стыков – $0,005D$;
- в монтажных стыках – $0,003D$;

3. Деформация отправочных элементов

– стрела прогиба – $1/750 \cdot L$, но не более 15 мм;

4. Отклонение оси ствола трубы от проектного – $0,003$ высоты выверяемой точки над фундаментом.

5. При изготовлении конструкций башен и мачт

– стрела прогиба оси ствола мачты при общей и контрольной сборке (длина собираемой части не менее расстояния между ярусами оттяжек) – $1/750$ расстояния между ярусами оттяжек;

– местные искривления образующих трубчатой листовой мачты, измеряемые прямолинейным шаблоном длиной 1 м (искривления и вмятины глубиной до 2 мм не учитываются) – $1/50$ длины искривлённого участка, но не более 0,5 толщины стенки трубы;

– угол между фактическим и проектным положениями фасонки для крепления оттяжек решетчатых и трубчатых мачт – 1° ;

– разность в толщине фасонки в одном фланцевом соединении – 1 мм.

Согласно данных нормативных документов [17, 18, 16, 19] установлены предельных отклонений по смещению кромок свариваемых деталей, а именно депланация и эксцентриситет стыковки. Допускается следующее смещение свариваемых кромок перед сваркой, не более:

- 0,5 мм, для деталей толщиной до 4 мм;

- 1,0 мм, для деталей толщиной 4-10 мм; 31

- $0,1s$, но не более 3 мм, для деталей толщиной 10-100 мм, где s – толщина свариваемых элементов.

Расчет сосудов и аппаратов, работающих под давлением производится до допускаемым напряжениям [21], а не по предельным состояниям, как для строительных конструкций [52].

В нормативных документах Еврокод [156] представлены требуемые допуски на геометрические отклонения, которые зависят от класса качества на изготовление. Нормативные документы СІСІND [152, 151, 160] приводят ограничения на предельные значения геометрических отклонений для вогнутости, аналогично [156]. Данные допуски можно применить к оболочкам металлических дымовых труб.

1.5.2 Особенности износа отдельностоящих дымовых труб

Особенности и характеристики повреждаемости дымовых труб представлены в работах по натурному обследованию технического состояния высотных сооружений [35, 36, 119, 136, 137, 138].

Основными причинами повреждений дымовых труб являются механическое воздействие, силовые, температурно-влажностные факторы, химические воздействия и их сочетание.

Проявлениями износа могут быть различные повреждения: разрывы, трещины, сколы, коррозия металла оболочки дымовой трубы. Эти проявления могут привести к деформации несущей конструкции, крену дымовой трубы, оседанию фундамента и разрушению футеровки. При этом основной причиной возникновения повреждений является несоответствие расчетных параметров работы и реальных эксплуатационных условий.

Износ дымовых труб, вызванный температурно-влажностными факторами, приводит к образованию вертикальных и горизонтальных трещин, коррозионному повреждению металла, появлению конденсата, который выходит на наружную поверхность трубы. Это может приводить к образованию наледей в верхней части трубы, которые увеличивают ветровую нагрузку. Химические воздействия также могут приводить к повреждениям, особенно к химической коррозии металла, которая разрушает защитное покрытие и является наиболее опасной, так как может привести к большим разрушениям.

В методических рекомендациях [119] приводятся различные повреждения стальных дымовых труб, которые подразделяются на три категории по степени опасности:

- категория опасности «А» относится к дефектам и повреждениям основных несущих конструкций труб, которые представляют прямую угрозу их разрушения;

- категория опасности «Б» относится к дефектам и повреждениям труб, не являющимся прямой угрозой разрушения несущих конструкций при обнаружении, однако способных в дальнейшем вызвать повреждения других

элементов и узлов или при развитии повреждения - перейти в категорию «А»;

- категория опасности «В» относится к дефектам и повреждениям локального характера, которые не могут оказывать влияния на основные несущие конструкции труб в случае их последующего развития.

При оценке технического состояния дымовых и вентиляционных труб в соответствии с документами по обследованию [119, 49], конструкции классифицируются по следующим категориям:

а) исправное — все элементы трубы соответствуют требованиям нормативных и проектных документов;

б) работоспособное — конструкции удовлетворяют требованиям для безопасной эксплуатации и обеспечения производственного процесса, но могут иметь незначительные отклонения от действующих норм и проектной документации;

в) ограниченно работоспособное — возможна дальнейшая эксплуатация конструкций при выполнении определенных условий контроля за их состоянием, параметрами технологического процесса, нагрузками и воздействиями, а также при разработке мероприятий по устранению выявленных дефектов и повреждений в установленные сроки

г) неработоспособное — конструкции потеряли несущую способность или их состояние таково, что дальнейшая эксплуатация без ремонта невозможна

д) предельное — дальнейшая эксплуатация конструкций недопустима или нецелесообразна, а восстановление их работоспособного состояния невозможно или нецелесообразно.

Таблица 1.3 – Виды повреждений стальных дымовых труб, предельно допустимые значения

1	Дефекты или повреждения	Предельно допустимые значения при техническом состоянии				
		исправное	работоспособное	ограничено работоспособное	неработоспособное	
		Категория опасности дефектов				
		В		Б	А	
1	2	3	4	5	6	
Фундаменты и основания						
1.1	Деформации оснований при высоте трубы Н, м:	Крен ствола ,i	Средняя осадка (Δ, мм)	На основании расчета		Значения, которые превышают расчетные
	≤100	0,005	≤400	-«-		
	100<Н≤200	1/(2Н)	≤300	-«-		
	100<Н≤300	1/(2Н)	≤200	-«-		
1.2	Наличие горизонтальных трещин на поверхности железобетонного фундамента	Не допускается		До 0,3 мм	До 1,0 мм	Свыше 1,0 мм
1.3	Наличие вертикальных трещин на поверхности железобетонного фундамента с шириной раскрытием t _{кр}	Выше уровня грунтовых вод (УГВ) t _{кр} ≤ 0,3 мм		Выше УГВ t _{кр} ≤ 2,0 мм	Выше УГВ t _{кр} ≤ 3,0 мм	Выше УГВ t _{кр} >5,0 мм
		Ниже УГВ t _{кр} ≤ 0,1 мм		Ниже УГВ t _{кр} ≤ 1,5 мм	Ниже УГВ t _{кр} ≤ 3,0 мм	Ниже УГВ t _{кр} >3.0 мм
1.4	Сколы бетона с оголение арматуры	Не допускается		На площади до 1 м ² и глубиной до 30 мм; коррозия арматуры не более 50 %	На площади до 2 м ² и глубиной до 50 мм; коррозия арматуры не более 20 %	На площади более 2 м ² и глубиной более 50 мм; коррозия арматуры более 20 %
1.5	Сколы бетона, с потерей устойчивости арматуры (вертикальной)	Не допускается				Имеют места
2	Ствол стальной дымовой трубы					
2.1	Отклонение оси ствола Q от вертикали	f ≤ 0.006-0.008 Н		На основании расчета		Значения, которые превышают расчетные
2.2	Трещины в основном металле и сварных швах ствола	Не допускается				Имеют место

2.3	Выпуклости и вмятины на поверхности ствола, отклонение от проектных размеров	Не более 1% размера диаметра трубы в рассматриваемом сечении	На основании расчета		
2.4	Коррозионный износ стенки трубы в опорной части ствола, в зоне фланцевых соединений, в местах крепления оттяжек, светофорных площадок и лестниц	Не допускается	До 15 % толщины стенки в одном сечении при толщине стенки не менее 4 мм	До 30 % толщины стенки в одном сечении при толщине стенки не менее 4 мм	Более 30 % толщины стенки в одном сечении
2.5	Сквозные разрушения и прогары стенок трубы	Не допускается			Имеют место
2.6	Разрыв растяжек				
2.7	Горизонтальное смещение верха трубы от нормативной ветровой нагрузки	Не более $(1/75) H$	На основании расчета		Значения, которые превышают расчетные
2.8	Прогары опорных колец под футеровку	Не допускается			Имеют место
2.9	Разрушение антикоррозионных покрытий	Не допускается	До 40 % площади покрытия	До 100 % площади покрытия	-
2.10	Ослабление натяжных оттяжек	Не допускается	Не более 30 %	Не более 50 %	Более 50 %
2.11	Повреждение основных несущих узлов (для индивидуальных труб с гасителями колебаний и трубные комплексы с центральной башней)	Не допускается			Имеет место
3	Футеровка				
3.1	Повреждение участков футеровки (выпучивание, нависание) и обрушение	Не допускается		Допускается до 300 мм на площади до 1 м ²	Величиной до 300 мм на площади до 1 м ²
3.2	Коррозионное повреждение футеровки	Не допускается	Разрушение на глубину: кирпича – до 20 мм, раствора – до 40 мм на площади до 1,0 м ²	Разрушение на глубину: кирпича – до 50 мм, раствора – до 60 мм на площади до 21,0 м ²	Разрушение на глубину: кирпича – более 50 мм, раствора – более 60 мм на площади более 2,0 м ²
3.3	Компенсационные зазоры в узлах сопряжения звеньев футеровки	Не менее 60 мм в трубах без вентилируемого зазора и при сроке эксплуатации менее 5	На основании заключения экспертной организацией		Менее величины, указанной экспертной организацией

		лет. Не менее 40 мм в остальных случаях			
3.4	На футеровке обнаружено разрушение паро-, теплоизоляции и антикоррозийной защиты	Не допускается	На основании экспертной организацией		Более величины, установленной экспертной организацией
3.5	Наличие трещин (наклонные и вертикальные)	До 0,5 мм	До 2 мм	До 10 мм	Более 100 мм на более чем трех участках длиной более 8 рядов
3.6	Горизонтальные трещины	До 0,5 мм	До 2 мм	До 5 мм	Более 5 мм
4	Металлоконструкции гарнитуры				
4.1	Трещины в элементах стяжных колец	Не допускается			Имеют место
4.2	Ослабление натяжения стяжных колец	Не менее	В течении не более трех лет после подтяжки 50-60 МПа	В течении не более трех лет после подтяжки 50-60 МПа	Менее 30 Мпа в течении года после подтяжки до 50-60 МПа
4.3	Прогибы элементов ходовых лестниц, ограждений, площадок	Не допускается	Допускается для отдельных элементов ограждения, при сохранности узлов их сопряжения с несущими элементами		Нарушение узлов крепления элементов ограждения с несущими элементами. Повреждение несущих элементов
4.4	Повреждения элементов лестниц, ограждений, площадок в виде трещин, обрывов.				Имеют место
4.5	Нарушение соединений и коррозия молниепроводов.	Сопротивление контура не более 50 Ом			Сопротивление контура более 50 Ом
4.6	Коррозионные повреждения металлоконструкций стяжных колец, элементов ходовых лестниц, ограждений, светофорных площадок	Не допускается	До 15%	До 30 %	Более 30 %

1.5.3 Основы расчета несущей способности металлических конструкций с учётом повреждений

Основные принципы расчета эксплуатируемых конструкций включают:

1. Проведение проверочных расчетов для убедительной проверки обеспечения несущей способности на протяжении заданного срока эксплуатации.
2. Расчет элементов усиления и усиленных конструкций в целом в случае, если имеется недостаточная несущая способность.

Проверочные расчеты основаны на реальном состоянии конструкций, имеющих повреждения, а также на значениях реально действующих нагрузок и действительной прочности стали.

Определение работоспособности эксплуатируемых конструкций производится путем выполнения проверочного расчета, учитывающего данные, полученные при натурных исследованиях конструкций. Проверочный расчет должен быть адаптирован к конструкциям, находящимся в эксплуатации, с учетом методики расчета по предельным состояниям. Условие обеспечения несущей способности и работоспособности формулируется в соответствии с этими требованиями:

$$N_9 \leq \Phi_9 \leq \Phi, \quad (1.21)$$

где N_9 – максимальное усилие в конкретной конструкции или ее элементе, обусловленное условиями эксплуатации;

Φ – проектная несущая способность, т.е. максимальное усилие, которое способна выдержать конструкция или ее элемент;

Φ_9 – фактическая несущая способность конструкции на данный момент эксплуатации.

В развернутом виде общая форма проверок по предельным состояниям для эксплуатируемых конструкций имеет вид

$$N_e(\sum F_{eni} \cdot \gamma_{efi} \cdot \psi_{ei} \cdot \gamma_n, \Lambda_e, \Omega_e) \leq R_o \Phi(\Omega_e, \Lambda_e) \gamma_c, \quad (1.22)$$

где $N_e()$ – функция перехода от внешних воздействий и геометрии конструкции к внутренним усилиям при проверочных расчетах;

Λ_e – характеристики, описывающие общую геометрию конструкций по результатам натурных обследований;

Ω_e – геометрические характеристики сечений, определяемые при натурных обмерах;

$\Phi(\)$ – функция перехода от геометрических характеристик сечения к несущей способности; для большинства расчетов на прочность и устойчивость $\Phi(\Omega_e, \Lambda_e) = \Omega_e$, более сложные зависимости используются при проверках устойчивости положения, общей устойчивости конструкции и некоторых других;

F_{eni} – уточненные характеристические значения нагрузок;

γ_{efi} – коэффициенты надежности для уточненных нагрузок;

ψ_{ei} – уточненные коэффициенты сочетаний нагрузок при наличии двух и более временных нагрузок;

R_o – расчетное сопротивление стали существующих конструкций;

γ_c – коэффициент условий работы, учитывающий степень важности конструкции или ее элемента, условности расчетной схемы и другие особенности работы.

При проведении проверочных расчетов для существующих конструкций необходимо учитывать обнаруженные при обследовании повреждения. При этом важно учитывать характер повреждения и его влияние на напряженно-деформированное состояние конструкции. В зависимости от этих факторов может быть использовано изменение геометрических характеристик Ω_e или геометрических схем Λ_e для количественно характеризуемых повреждений, которые могут быть введены в расчет усилий или проверочные формулы.

Учет повреждений в проверочных расчетах является крайне важным и зависит от особенностей повреждений. В зависимости от способа учета в расчетах повреждений, их можно разделить на четыре типа: повреждения, которые влияют на напряженно-деформированное состояние конструкции в целом; локальные повреждения, которые приводят к перераспределению усилий;

повреждения, которые изменяют жесткостные характеристики элементов и повышают напряжения; и недопустимые повреждения, которые не учитываются в расчете.

Более детальное описание способов учета дефектов и повреждений, указанных в [49], приводится в таблице 1.4. Особое внимание следует уделять выбору правильного метода учета дефектов и повреждений, так как это может существенно влиять на точность расчетов и, соответственно, на безопасность конструкции.

Таблица 1.4. – Способы учета повреждений в проверочных расчетах

№	Описание повреждения	Способ учета в расчете
1.	Равномерный и неравномерный коррозионный износ.	Назначение соответствующих геометрических характеристик сечения в расчетной схеме при определении усилий и при проверке напряжений.
2.	Замена сечений элементов	
3.	Общий выгиб конструкции в плоскости и из плоскости.	При задании координат узлов расчетной схемы.
4.	Общие искривления и местные погнутости элементов.	Расчет дополнительных моментов, проверка несущей способности стержней как внецентренно-сжатых (растянутых).
5.	Смещение осей стержней в сквозных конструкциях, расцентровка элементов в узлах.	
6.	Смещение осей конструкций, опирающихся друг на друга	
7.	Отклонения конструкций от вертикали.	
8.	Внеузловое крепление элементов.	
9.	Ослабления сечения элементов в виде вырезков, вырывов, прожогов, локального коррозионного износа.	Назначение соответствующих геометрических характеристик сечения при проверке напряжений.
10.	Замена видов соединений.	Задание типа узловых соединений в расчетной схеме.
11.	Погнутость фундаментных болтов.	Задание типа опорных креплений в расчетной схеме.
12.	Разрывы и изломы элементов.	Не допускаются для отдельного элемента.

		В конструкции в целом учитываются при составлении расчетной схемы.
13.	Отклонения положения элементов сечения от проектного, такие как погнутости и выгнутость стенки.	Назначение соответствующих геометрических характеристик сечения при проверке напряжений.
14.	Трещины в основном металле и сварных швах.	Не допускаются.
15.	Сквозная коррозия сечений элементов.	Не допускаются.
16.	Разрушения в соединениях в виде смятия по основному металлу, отрыв головок болтов ослабление и отсутствие болтов и заклепок и др.	Не допускаются.
17.	Повреждения сварных швов.	Не должны превышать допускаемые значения.
18.	Несоответствие конструктивных размеров элементов принятым в нормативно-технической литературе.	Допустимость устанавливается согласно требованиям норм или проверяется расчетом.

Важно также отметить, что при проведении проверочных расчетов необходимо учитывать не только обнаруженные при обследовании повреждения, но и возможные неблагоприятные условия эксплуатации конструкции, такие как изменение температуры, воздействие влаги и т.д. Поэтому необходимо проводить регулярное обследование и техническое обслуживание конструкции для своевременного выявления и устранения возможных дефектов и повреждений, а также для поддержания ее надежности и безопасности в течение всего срока эксплуатации.

1.6. Методы технического обслуживания дымовых труб

Методам оценки эксплуатационной надежности зданий и сооружений посвящены работы Н.С. Стрелецкого [120, 121, 122, 123], Е.В. Горохова [14, 15, 85, 87, 106, 107], Н.П. Мельникова [73, 118], М.Д. Корчака [66], В.П. Королева [64, 65], А.В. Перельмутера [88, 89, 90], С.Ф. Пичугина [93].

Согласно [143], техническое обслуживание представляет собой комплекс операций, направленных на обеспечение работоспособности изделия во время

его использования в соответствии с назначением. В случае технического обслуживания зданий и сооружений, это включает выполнение работ по надзору, диагностике и оценке технического состояния в соответствии с принятой методологией, прогнозированию остаточного ресурса, а также принятию корректирующих или восстановительных мероприятий.

Для строительных конструкций промышленных зданий [144, 145] определены следующие виды мероприятий по обслуживанию:

- а) Осмотры - это текущий контроль состояния конструкций;
- б) Обследования - это детальный контроль состояния конструкций;
- в) Ремонты - это мероприятия по полному или частичному восстановлению несущей способности конструкций.

Однако, анализ существующих подходов к стратегиям технического обслуживания зданий и сооружений показывает, что эти методы предназначены для широкого применения и не учитывают индивидуальные особенности каждого сооружения и технологического процесса. В результате возникает потребность связать техническое обслуживание с проектированием, используя количественное описание процессов износа и восстановления

За границей существуют разные концепции, на основе которых формулируются стратегии технического обслуживания. Среди основных концепций можно выделить обслуживание, ориентированное на надежность (RCM), бизнес-ориентированное обслуживание (BCM) и общее техническое обслуживание (TPM) [166]. Однако, большинство этих методов применяются в контексте массового производства и не учитывают индивидуальные особенности инженерных сооружений. Из-за проблемы коррозионного износа, который вызывает потери до 5% от общего национального продукта в промышленно развитых странах, необходимо разрабатывать методы, учитывающие специфику каждого типа сооружений [167, 109, 168, 169, 170]. Для сокращения потерь от коррозии необходимо осуществлять контроль и обслуживание сооружений.

В [169] подробно рассмотрены стратегии ремонта в условиях коррозионного износа, включая три основных типа: непрерывный контроль

параметров повреждений, немедленный ремонт после обнаружения повреждения и периодический ремонт в установленные сроки или замена элементов. Для определения стратегии обслуживания необходима работа команды экспертов, которые принимают условные вероятности отказов, оценивают последствия отказов и аварий, и на основании этого определяют периодичность обследования различных элементов, методы контроля, допустимые значения контролируемых параметров и т.д.

В трудах М.М. Сахновского [77], А.И. Лантух-Лященко [69], А.Г. Ройтмана [99], В.В. Губанова [31], Ю.М. Ярового [136, 138], В.А. Банаха [4] рассмотрены общие принципы обслуживания и эксплуатации строительных конструкций. В этих работах применяются две основные системы технического обслуживания, а именно планово-предупредительные ремонты и ремонты на основе результатов обследования.

За последние два десятилетия были опубликованы исследования, посвященные нормам и рекомендациям по обслуживанию металлических, железобетонных и кирпичных дымовых труб [139, 140, 141, 119, 142]. В этих работах рассматриваются вопросы обслуживания труб на основе осмотров, периодичности обследования, а также рекомендации по выполнению ремонтных работ, надзору и ведению эксплуатационной документации. Обследование может быть в виде осмотра или полной/неполной комплексной программы. При полной программе проводится анализ документации, измерение параметров отводимых газов, исследование состояния материалов и конструктивных элементов трубы, комплексный расчет трубы и исследование изменения геологических условий. При неполной программе измерения температурно-влажностных, газовых и аэродинамических параметров могут быть исключены без внутреннего осмотра поверхности или футеровки. Классификация обследований по объему и составу работ приводится в одной из работ.

При анализе методов обслуживания высотных сооружений можно заключить, что нормы и правила, регулирующие этот процесс, соответствуют системе планово-предупредительных ремонтов. Однако, не все важные аспекты обслуживания были учтены, такие как: определение необходимого усиления для

обслуживания на основе количественных параметров работоспособности сооружения.

1.7. Выводы по разделу I. Цели и задачи исследования

В результате анализа существующих методов расчета нагрузок, методов проектирования и эксплуатации дымовых труб сделаны следующие выводы:

1. Нормативные документы, которые определяют правила расчета и проектирования стальных строительных конструкций, включая дымовые трубы, указывают на необходимость проверки несущей способности оболочек дымовых труб, а также о необходимости проверки наиболее ответственных лацменных узлов.

2. В нормативных документах, регулирующих расчеты и проектирование стальных строительных конструкций, в том числе дымовых труб, подчеркивается необходимость проверки несущей способности оболочек дымовых труб, а именно проверка наиболее ответственных узлов сооружения.

3. Основы расчета несущей способности стальных конструкций с учетом повреждений включают проведение проверочных расчетов, расчет элементов усиления и учет обнаруженных повреждений при обследовании. Расчеты выполняются для обеспечения надежности и безопасности конструкций, включая изменение геометрических характеристик и использование методов учета дефектов. Регулярное обследование и техническое обслуживание конструкций необходимы для обнаружения и устранения дефектов, поддержания их безопасности.

4. Для обеспечения работоспособности дымовых труб в течение их эксплуатации необходимо проводить регулярные осмотры и обследования, а также при необходимости выполнять ремонтные работы. Исследования и нормы по обслуживанию указывают на важность выполнения таких мероприятий, включая осмотр, оценку состояния и рекомендации по ремонту.

4. При анализе методов обслуживания высотных сооружений можно заключить, что нормы и правила, регулирующие этот процесс, соответствуют системе планово-предупредительных ремонтов. Однако, не все важные аспекты

обслуживания были учтены, такие как: определение необходимого усиления для обслуживания на основе количественных параметров работоспособности сооружения.

На основе проведенного анализа существующих методов расчета нагрузок, проектирования и эксплуатации дымовых труб, определены цель и задачи исследования.

Цель исследования: уточнение несущей способности стальных дымовых труб на оттяжках с учетом процессов износа и технического обслуживания.

Задачи исследования:

- анализ методов расчета, проектирования и эксплуатации дымовых труб;
- определение количественных и качественных параметров процессов износа дымовых труб;
- исследование влияния повреждений лацменного узла на несущую способность дымовых труб с оттяжками;
- разработка эффективных методов технического обслуживания с учетом их влияния на напряженно-деформированное состояние несущих конструкций.

Объект исследования – стальные дымовые трубы на оттяжках для отвода дымовых газов котельных установок.

Предмет исследования – изменение напряженно-деформированного состояния дымовых труб на оттяжках в условиях износа и восстановления.

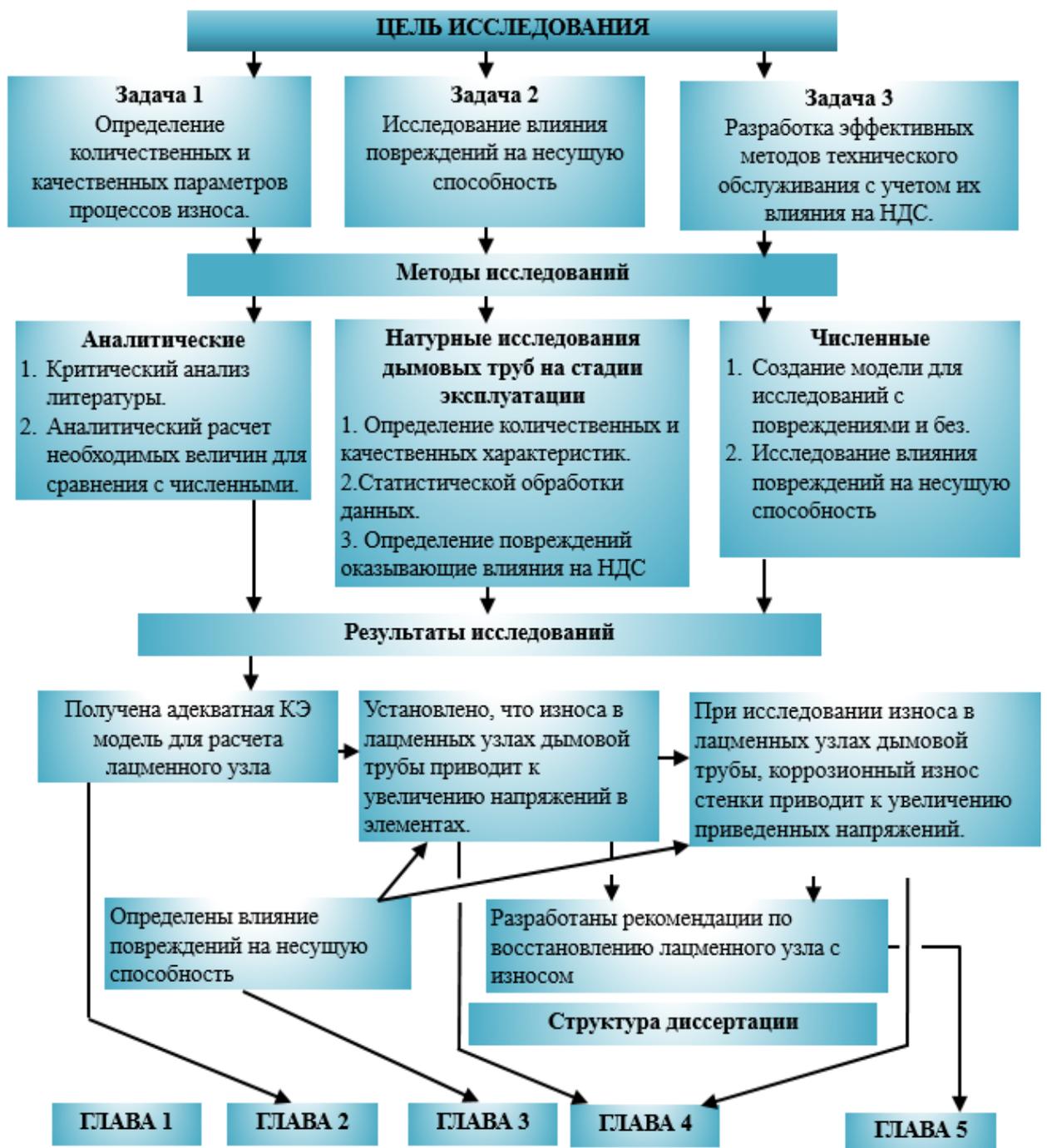


Рисунок 1.7 – Структурно-логическая схема диссертационного исследования

РАЗДЕЛ II. РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ПРОВЕДЕНИЯ ЧИСЛЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

2.1 Методика статического расчета дымовых труб с двумя уровнями оттяжек

2.1.1. Расчет усилий в оттяжках

На основании методов расчета таких авторов как А.Г. Соколов, Г.А. Савицкий, Д.Р. Меркин [11, 24, 25] разработана методика статического расчета дымовых труб с оттяжек на основании систем уравнений равновесия состояния оттяжек для различного положения их в пространстве.

Рассматривается наклонная гибкая нить с опорой в одном уровне и нагруженной равномерно распределенной нагрузкой, распределённой по пролету. В таком случае гибкая нить принимает форму цепной линии.

Длина кривой провисания горизонтальной нерастяжимой нити, имеющей форму параболы, определяется по формуле:

$$S = l + \frac{q^2 \cdot l^3}{24H^2}, \quad (2.1)$$

где l – пролет нити;

H – сила распора нити вдоль пролета;

q – равномерно распределенная нагрузка по пролету l .

Для определения длины кривой наклонной нити (рис. 2.1) с малыми стрелками провиса f полагается:

- 1) за расчетный пролет принимается хорда L кривой провисания;
- 2) нагрузка q равномерно распределена по длине хорды L ;
- 3) усилие натяжения T действует вдоль длины хорды L , значит

$$T \approx \frac{H}{\cos \beta}. \quad (2.2)$$

Учитывая предпосылки, запишем длину кривой наклонной нерастяжимой нити:

$$S = L + \frac{q^2 \cdot L^3}{24 \cdot T^2} = const, \quad (2.3)$$

где: L – длина хорды наклонной нити;

q – нагрузка на нить;

T – усилие натяжения нити.

Длина хорды наклонной нити:

$$L = \frac{l}{\cos \beta}, \quad (2.4)$$

где β – угол наклона нити к горизонтали $\beta = \arctg(h/l)$,

l – горизонтальная проекция расчетного пролета;

h – разность высот точек подвески нити.

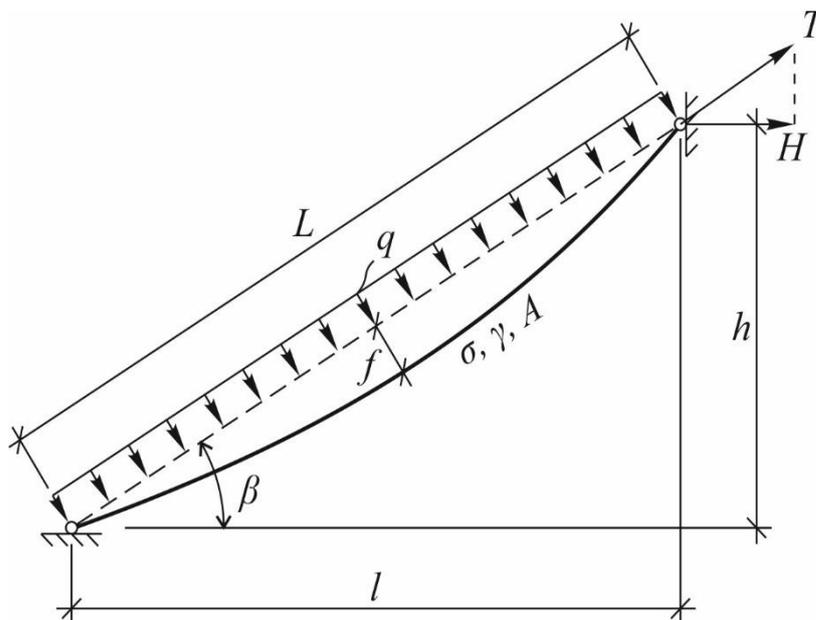


Рисунок 2.1 – Схема наклонной гибкой нити

Действительная длина наклонной нити составляет длину по кривой провисания минус упругие удлинения:

$$S_d = S - \Delta S_{\text{упр}}, \quad (2.5)$$

где: S – длина кривой наклонной нерастяжимой нити;

$\Delta S_{\text{упр}}$ – упругое удлинение нити.

Если принять, что длина нити незначительно отличается от длины хорды и среднее усилие натяжения в нити равно распору, по закону Гука получим

упругое удлинение наклонной нити:

$$\Delta S_{\text{упр}} = T \cdot \frac{L}{EA}, \quad (2.6)$$

где T – усилие натяжения нити;

L – длина хорды;

E – модуль упругости нити;

A – площадь поперечного сечения нити.

Действительная длина наклонной нити составляет

$$S_{\text{д}} = L + \frac{q^2 \cdot L^3}{24 \cdot T^2} - \frac{T \cdot L}{E \cdot A} = \text{const} \quad (2.7)$$

При изменении нагрузки на нить и температуры, уравнение действительной длины кривой провисания наклонной гибкой нити для начального состояния в общем виде будет иметь вид

$$S_{\text{д},0} = S_{\text{д},1} - \Delta S(\Delta t) = \text{const}, \quad (2.8)$$

где $S_{\text{д},0}$ – действительная длина нити в начальном состоянии;

$S_{\text{д},1}$ – действительная длина нити в конечном состоянии;

$\Delta S(\Delta t)$ – упругое удлинение нити под действием изменения температуры.

Действительная длина по кривой провисания нити в начальном и конечном состояниях аналогично (2.7)

$$\begin{aligned} S_{\text{д},0} &= L + \frac{q_0^2 \cdot L^3}{24 \cdot T_0^2} - \frac{T_0 \cdot L}{E \cdot A} \\ S_{\text{д},1} &= L + \frac{q_1^2 \cdot L^3}{24 \cdot T_1^2} - \frac{T_1 \cdot L}{E \cdot A} \end{aligned} \quad (2.9)$$

где q_0 и q_1 – нагрузка в начальном и конечном состояниях;

T_0 и T_1 – натяжение в начальном и конечном состояниях;

L – длина хорды;

E – модуль упругости для нити;

A – площадь поперечного сечения нити.

Упругое удлинение нити под действием изменения температуры Δt :

$$\Delta S(\Delta t) = \alpha_t \cdot \Delta t \cdot L, \quad (2.10)$$

где α_t – температурный коэффициент линейного расширения нити;

Δt – изменение температуры, $\Delta t = t_1 - t_0$.

Подставив в выражение (2.8) формулы (2.9), (2.10) и разделив уравнение на L , получим уравнение равновесия наклонной гибкой нити в относительных деформациях:

$$\frac{q_0^2 \cdot L^2}{24 \cdot T_0^2} - \frac{T_0}{E \cdot A} = \frac{q_1^2 \cdot L^2}{24 \cdot T_1^2} - \frac{T_1}{E \cdot A} - \alpha_t \cdot \Delta t, \quad (2.11)$$

где L – длина хорды наклонной нити;

H_0 и H_1 – распор в начальном и конечном состоянии;

q_0 и q_1 – нагрузка в начальном и конечном состоянии;

β – угол наклона нити к горизонтали.

Рассмотрим случай смещения опоры наклонных нитей в двух уровнях по горизонтали на расстояние y_1, y_2 и по вертикали на расстояние $\Delta h_1, \Delta h_2$ (рис.2.2).

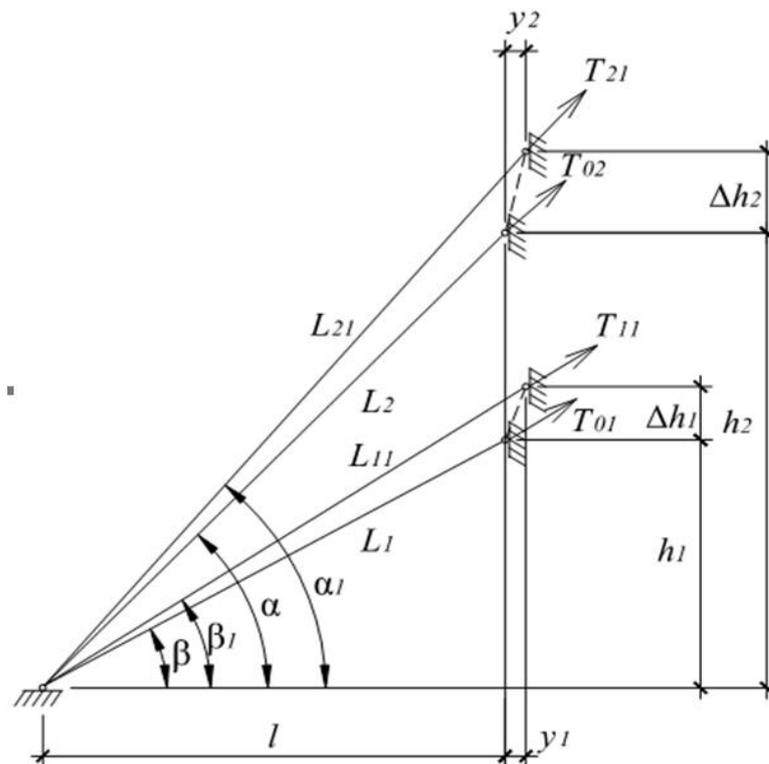


Рисунок 2.2 – Схема наклонных оттяжек в двух уровнях при перемещении опоры

При перемещении узлов длина хорды становится равной L_{11}, L_{21} , а углы наклона β_1, α_1 .

$$\begin{aligned} L_1 &= L_{11} + \Delta L_1 \\ L_2 &= L_{21} + \Delta L_2 \end{aligned}$$

Вследствие малости y_1, y_2 и $\Delta h_1, \Delta h_2$ по отношению к пролету l и высоте h можно предположить, что $\beta_1 \approx \beta, \alpha_1 \approx \alpha$. Тогда длина хорды в конечном состоянии будет равна

$$\begin{aligned} L_1 &= L_{11} + \Delta L_1 = L_1 + y_1 \cdot \cos \beta + \Delta h_1 \cdot \sin \beta \\ L_2 &= L_{21} + \Delta L_2 = L_2 + y_2 \cdot \cos \alpha + \Delta h_2 \cdot \sin \alpha \end{aligned} \quad (2.12)$$

где L_1, L_2 – длины хорд в начальном состоянии для 1-го и 2-го уровня;

$\Delta L_1, \Delta L_2$ – величины изменения длины хорды

$$\begin{aligned} \Delta L_1 &\approx y_1 \cdot \cos \beta + \Delta h_1 \cdot \sin \beta \\ \Delta L_2 &\approx y_2 \cdot \cos \alpha + \Delta h_2 \cdot \sin \alpha \end{aligned} \quad (2.13)$$

где y_1, y_2 – смещение опорного узла по горизонтали для 1-го и 2-го уровня;

$\Delta h_1, \Delta h_2$ – смещение опорного узла по вертикали для 1-го и 2-го уровня.

Длина кривой провисания наклонной нити для конечного состояния, учитывая (2.10), будет равна

$$\begin{aligned} S_{д,1} &= L_1 + \Delta L_1 + \frac{q_1^2 \cdot (L_1 + \Delta L_1)^3}{24 \cdot T_{11}^2} - T_{11} \cdot \frac{L_1 + \Delta L_1}{EA} \\ S_{д,2} &= L_2 + \Delta L_2 + \frac{q_2^2 \cdot (L_2 + \Delta L_2)^3}{24 \cdot T_{21}^2} - T_{21} \cdot \frac{L_2 + \Delta L_2}{EA} \end{aligned} \quad (2.14)$$

где T_{11}, T_{21} – усилие натяжения нити в конечном состоянии для 1-го и 2-го уровня.

Пренебрегаем величинами $\Delta L_1, \Delta L_2, \Delta h_1, \Delta h_2$ как сравнительно малыми величинами по отношению к длине хорды L . Учитывая (2.13), длина кривой в конечном состоянии получится

$$\begin{aligned}
S_{д,1} &= L_1 + \frac{q_1^2 \cdot L_1^3}{24 \cdot T_{11}^2} - T_{11} \cdot \frac{L_1}{EA} + \Delta l_1 \cdot \cos \beta \\
S_{д,2} &= L_2 + \frac{q_2^2 \cdot L_2^3}{24 \cdot T_{21}^2} - T_{21} \cdot \frac{L_2}{EA} + \Delta l_2 \cdot \cos \alpha
\end{aligned} \tag{2.15}$$

Уравнение равновесия наклонной гибкой нити в относительных деформациях с учетом перемещения опоры, выведенное аналогично (2.11):

$$\begin{aligned}
\frac{q_{01}^2 \cdot L_1^2}{24 \cdot T_{01}^2} - \frac{T_{01}}{E \cdot A} &= \frac{q_{11}^2 \cdot L_1^2}{24 \cdot T_{11}^2} - \frac{T_{11}}{E \cdot A} - \alpha_t \cdot \Delta t \pm \frac{y_1}{L_1} \cdot \cos \beta \\
\frac{q_{02}^2 \cdot L_2^2}{24 \cdot T_{02}^2} - \frac{T_{02}}{E \cdot A} &= \frac{q_{21}^2 \cdot L_2^2}{24 \cdot T_{21}^2} - \frac{T_{21}}{E \cdot A} - \alpha_t \cdot \Delta t \pm \frac{y_2}{L_2} \cdot \cos \alpha
\end{aligned} \tag{2.16}$$

Принимая, что напряжение в нити $\sigma_i = T_i/A$, длина хорды $L_1 = l/\cos \beta$, $L_2 = l/\cos \alpha$, а удельная нагрузка $\gamma_i = q_i/A$, получаем

$$\begin{aligned}
\frac{\gamma_{01}^2 \cdot L_1^2}{24 \cdot \sigma_{01}^2} - \frac{\sigma_{01}}{E} &= \frac{\gamma_{11}^2 \cdot L_1^2}{24 \cdot \sigma_{11}^2} - \frac{\sigma_{11}}{E} - \alpha_t \cdot \Delta t \pm \frac{y_1}{L_1} \cdot \cos \beta \\
\frac{\gamma_{02}^2 \cdot L_2^2}{24 \cdot \sigma_{02}^2} - \frac{\sigma_{02}}{E} &= \frac{\gamma_{21}^2 \cdot L_2^2}{24 \cdot \sigma_{21}^2} - \frac{\sigma_{21}}{E} - \alpha_t \cdot \Delta t \pm \frac{y_2}{L_2} \cdot \cos \alpha
\end{aligned}$$

Введем обозначения

$$\begin{aligned}
D_{11} &= \frac{\gamma_{11}^2 \cdot L_1^2}{24}, & D_{01} &= \frac{\gamma_{01}^2 \cdot L_1^2}{24} \\
D_{21} &= \frac{\gamma_{21}^2 \cdot L_2^2}{24}, & D_{02} &= \frac{\gamma_{02}^2 \cdot L_2^2}{24}
\end{aligned} \tag{2.17}$$

Уравнения равновесия наклонных гибких нити в терминах напряжений будет иметь вид

$$\begin{aligned}
\left(\frac{\sigma_{11}}{E} - \frac{D_{11}}{\sigma_{11}^2} \right) - \left(\frac{\sigma_{01}}{E} - \frac{D_{01}}{\sigma_{01}^2} \right) &= \pm y_1 \frac{\cos \beta}{L_1} + \alpha_t (t_{c1} - t_{c0}) + \alpha_t (t_{s1} - t_{s0}) \cdot \sin \beta \\
\left(\frac{\sigma_{21}}{E} - \frac{D_{21}}{\sigma_{21}^2} \right) - \left(\frac{\sigma_{02}}{E} - \frac{D_{02}}{\sigma_{02}^2} \right) &= \pm y_2 \frac{\cos \alpha}{L_2} + \alpha_t (t_{c1} - t_{c0}) + \alpha_t (t_{s1} - t_{s0}) \cdot \sin \alpha
\end{aligned} \tag{2.18}$$

где $D_{01}, D_{11}, D_{02}, D_{21}$ – параметры, учитывающие увеличение длины нити за счет провисания от нагрузки на нить, в начальном и конечном состояниях для 1-го и 2-го уровня.

Рассмотрим две наклонные нити пролетом l с высотой закрепления h , соединенные в одной общем узле (рис. 2.3) для 1-го уровня оттяжек.

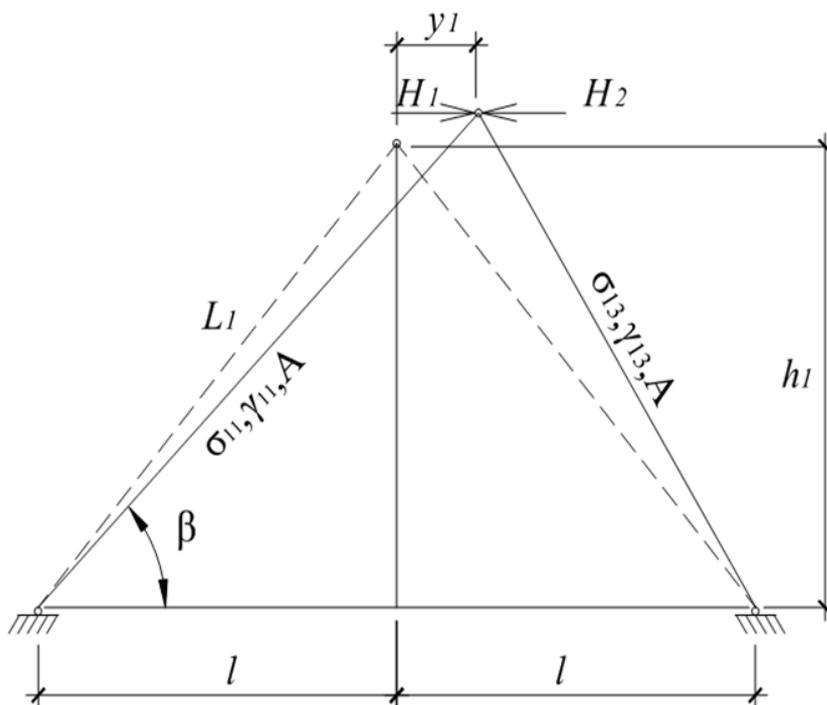


Рисунок 2.3 – К расчету двух наклонных нитей с общей опорой первого уровня

Запишем уравнения равновесия для каждой нити с учетом перемещения общего опорного узла, используя формулу (2.18). Уравнение равновесия для первой нити:

$$\left(\frac{\sigma_{11}}{E} - \frac{D_{11}}{\sigma_{11}^2} \right) - \left(\frac{\sigma_{01}}{E} - \frac{D_{01}}{\sigma_{01}^2} \right) = y_1 \frac{\cos \beta}{L_1} + \alpha_t (t_{c1} - t_{c0}) \quad (2.19)$$

где σ_{11} – напряжение первой нити в конечном состоянии;

σ_{01} – напряжение нити в начальном состоянии;

$t_{c1} - t_{c0}$ – разница температур нити между конечным и начальным состояниями;

где y_1 – смещение опорного узла по горизонтали для 1-го уровня;

Уравнение равновесия для второй нити:

$$\left(\frac{\sigma_{13}}{E} - \frac{D_{13}}{\sigma_{13}^2} \right) - \left(\frac{\sigma_{01}}{E} - \frac{D_{01}}{\sigma_{01}^2} \right) = -y_1 \frac{\cos \beta}{L_1} + \alpha_t (t_{c1} - t_{c0}) \quad (2.20)$$

где σ_{13} – напряжение второй нити в конечном состоянии;

Рассмотрим узел соединения двух оттяжек в конечном состоянии.

Равновесие горизонтальных сил для наклонных нитей будет иметь вид

$$H_{r1} = H_1 - H_2, \quad (2.21)$$

где H_{r1} – горизонтальная удерживающая сила 1-го уровня;

H_1 – распор в первой нити в конечном состоянии;

H_2 – распор во второй нити в конечном состоянии.

Выразим значение распоров в нитях через их растягивающие напряжения. Усилие натяжения в нити $T = \sigma \cdot A$, а по предпосылкам к расчету наклонных нитей по формуле (2.2)

$$T \approx \frac{H}{\cos \beta}$$

Приравнивая данные выражения, выразим значение распора

$$H = \sigma \cdot A \cdot \cos \beta \quad (2.22)$$

где σ – напряжение в нити;

A – площадь поперечного сечения нити;

β – угол наклона оттяжек к горизонтали.

Для каждой из нитей в конечном состоянии распор равен

$$H_1 = \sigma_{11} \cdot A \cdot \cos \beta; \quad H_2 = \sigma_{13} \cdot A \cdot \cos \beta.$$

Горизонтальная удерживающая сила в опорном узле для наклонных нитей в конечном состоянии равна

$$H_{r1} = \sigma_{11} \cdot A \cdot \cos \beta - \sigma_{13} \cdot A \cdot \cos \beta = (\sigma_{11} - \sigma_{13}) \cdot A \cdot \cos \beta \quad (2.23)$$

Составим систему из вышеизложенных уравнений равновесия гибких нитей и уравнения горизонтальной удерживающей силы, учитывая изменение нагрузки

Система уравнений в терминах напряжений будет иметь вид

$$\begin{cases} \left(\frac{\sigma_{11}}{E} - \frac{D_{11}}{\sigma_{11}^2} \right) - \left(\frac{\sigma_{01}}{E} - \frac{D_{01}}{\sigma_{01}^2} \right) = y_1 \frac{\cos \beta}{L_1} + \alpha_t (t_{c1} - t_{c0}) \\ \left(\frac{\sigma_{13}}{E} - \frac{D_{13}}{\sigma_{13}^2} \right) - \left(\frac{\sigma_{01}}{E} - \frac{D_{01}}{\sigma_{01}^2} \right) = -y_1 \frac{\cos \beta}{L_1} + \alpha_t (t_{c1} - t_{c0}) \\ H_{r1} = (\sigma_{11} - \sigma_{13}) \cdot A \cdot \cos \beta \end{cases} \quad (2.24)$$

По аналогу составляется уравнений для 2-го уровня оттяжек.

Далее рассмотрим горизонтальную проекцию узла крепления оттяжек к стволу в двух уровнях.

На рис. 2.4 изображено закрепление оттяжек с четырьмя оттяжками в узле в двух уровнях.

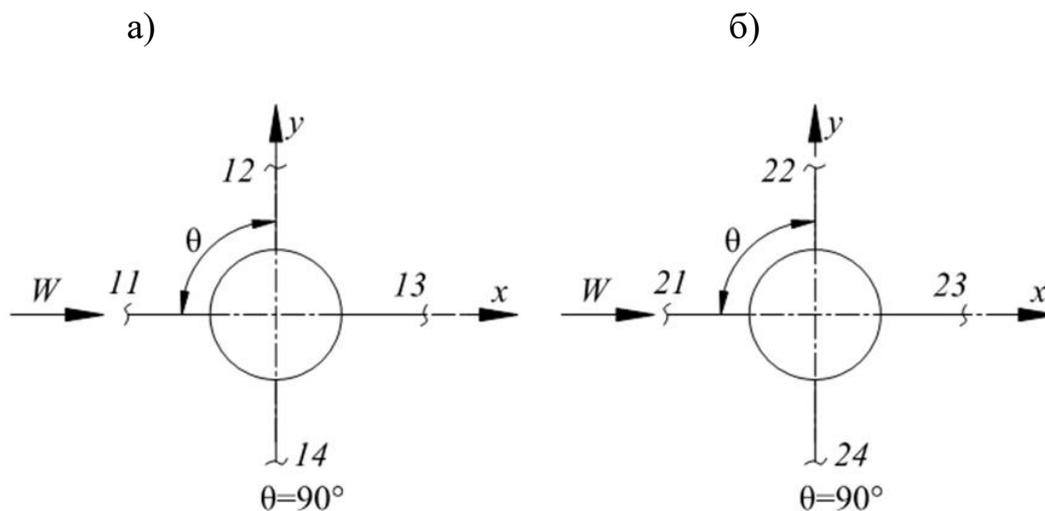


Рисунок 2.4 – Горизонтальная проекция узла оттяжек в двух уровнях:

а) 1-й уровень оттяжек в узле; б) 2-й уровень оттяжек в узле.

Для закрепления оттяжек, показанных выше можно записать системы уравнений, опираясь на описанные ранее уравнение равновесия гибкой наклонной нити (2.18) и уравнение равновесия узла (2.19). Необходимо отметить, что горизонтальное перемещение y_1, y_2 направлено вдоль ветрового потока (рис. 2.4).

Уравнение равновесия для первой наклонной нити равно:

- 1-й уровень оттяжек

$$\left(\frac{\sigma_1}{E} - \frac{D_{11}}{\sigma_{11}^2}\right) - \left(\frac{\sigma_{01}}{E} - \frac{D_{01}}{\sigma_{01}^2}\right) = \frac{y_1}{L_1} \cos \beta \cdot \cos \varphi, \quad (2.25)$$

- 2-й уровень оттяжек

$$\left(\frac{\sigma_{21}}{E} - \frac{D_{21}}{\sigma_{21}^2}\right) - \left(\frac{\sigma_{02}}{E} - \frac{D_{02}}{\sigma_{02}^2}\right) = \frac{y_2}{L_2} \cos \alpha \cdot \cos \varphi \quad (2.26)$$

где σ_{11}, σ_{21} – напряжение первой нити в конечном состоянии 1-го и 2-го уровня оттяжек;

σ_{01}, σ_{02} – напряжение нити в начальном состоянии 1-го и 2-го уровня оттяжек;

β – угол наклона 1-го уровня оттяжек к горизонтали;

α – угол наклона 2-го уровня оттяжек к горизонтали;

E – модуль упругости оттяжек;

D_{01} и D_{11} – параметры, учитывающие увеличение длины нити за счет провисания от распределенной нагрузки на нить, в начальном и конечном состояниях 1-го уровня оттяжек;

D_{02} и D_{21} – параметры, учитывающие увеличение длины нити за счет провисания от распределенной нагрузки на нить, в начальном и конечном состояниях 2-го уровня оттяжек;

y_1, y_2 – смещение опорного узла по горизонтали 1-го и 2-го уровня.

Для любой другой оттяжки можно записать уравнение в зависимости от ее номера, заданного по часовой стрелке от первой оттяжки:

-для 1-го уровня оттяжек

$$\left(\frac{\sigma_i}{E} - \frac{D_i}{\sigma_i^2}\right) - \left(\frac{\sigma_{01}}{E} - \frac{D_{01}}{\sigma_{01}^2}\right) = \frac{y_1}{L_1} \cos \beta \cdot \cos((i-1) \cdot \theta), \quad (2.27)$$

-для 2-го уровня оттяжек

$$\left(\frac{\sigma_i}{E} - \frac{D_i}{\sigma_i^2}\right) - \left(\frac{\sigma_{02}}{E} - \frac{D_{02}}{\sigma_{02}^2}\right) = \frac{y_2}{L_2} \cos \alpha \cdot \cos((i-1) \cdot \theta), \quad (2.28)$$

где

σ_i – напряжение i -й нити в конечном состоянии;

$\sigma_{01,02}$ – напряжение нити в начальном состоянии для оттяжек 1 и 2-го уровня;

θ – угол между оттяжками;

D_{01}, D_{02} и D_i – параметры, учитывающие увеличение длины нити за счет провисания от распределенной нагрузки на нить, в начальном и конечном состояниях.

Помимо уравнений равновесия узла необходимо записать уравнение равновесия горизонтальных сил в узле. Сумма всех сил от напряжений в каждой оттяжке должна равняться удерживающей силе в узле

$$H_{r1} = \sum_n H_i \cdot A \cdot \cos \beta, \quad H_{r2} = \sum_n H_i \cdot A \cdot \cos \alpha$$

где H_{r1}, H_{r2} – горизонтальная удерживающая сила для 1 и 2-го уровня;

H_i – распор в i -й нити в конечном состоянии;

A – площадь поперечного сечения нити;

β – угол наклона 1-го уровня оттяжек к горизонтали;

α – угол наклона 2-го уровня оттяжек к горизонтали;

Система уравнений равновесия для четырех оттяжек в узле в двух уровнях оттяжек в плоской системе имеет вид:

$$\begin{cases} E(\sigma_{11}, \sigma_{01}) = -E(\sigma_{13}, \sigma_{01}) \\ E(\sigma_{21}, \sigma_{02}) = -E(\sigma_{13}, \sigma_{02}) \end{cases} \quad (2.29)$$

Где относительная деформация для 1-го и 2-го уровня оттяжек:

$$\begin{aligned} E(\sigma_{11}, \sigma_{01}) &= \left[\left(\frac{\sigma_{11}}{E} - \frac{D_{11}}{\sigma_{11}^2} \right) - \left(\frac{\sigma_{01}}{E} - \frac{D_{01}}{\sigma_{01}^2} \right) \right] + \alpha_t(t_{c1} - t_{c0}) + \alpha_t(t_{s1} - t_{s0}) \cdot \sin \beta \\ E(\sigma_{13}, \sigma_{01}) &= \left[\left(\frac{\sigma_{13}}{E} - \frac{D_{13}}{\sigma_{13}^2} \right) - \left(\frac{\sigma_{01}}{E} - \frac{D_{01}}{\sigma_{01}^2} \right) \right] + \alpha_t(t_{c1} - t_{c0}) + \alpha_t(t_{s1} - t_{s0}) \cdot \sin \beta \\ E(\sigma_{21}, \sigma_{02}) &= \left[\left(\frac{\sigma_{21}}{E} - \frac{D_{21}}{\sigma_{21}^2} \right) - \left(\frac{\sigma_{02}}{E} - \frac{D_{02}}{\sigma_{02}^2} \right) \right] + \alpha_t(t_{c1} - t_{c0}) + \alpha_t(t_{s1} - t_{s0}) \cdot \sin \alpha \\ E(\sigma_{23}, \sigma_{02}) &= \left[\left(\frac{\sigma_{23}}{E} - \frac{D_{23}}{\sigma_{23}^2} \right) - \left(\frac{\sigma_{02}}{E} - \frac{D_{02}}{\sigma_{02}^2} \right) \right] + \alpha_t(t_{c1} - t_{c0}) + \alpha_t(t_{s1} - t_{s0}) \cdot \sin \alpha \end{aligned} \quad (2.30)$$

горизонтальное смещение узла крепления:

$$y_1(\sigma_{11}, \sigma_{01}) = \frac{L_1}{\cos \beta} \left[\left[\left(\frac{\sigma_{11}}{E} - \frac{D_{11}}{\sigma_{11}^2} \right) - \left(\frac{\sigma_{01}}{E} - \frac{D_{01}}{\sigma_{01}^2} \right) \right] + \alpha_t (t_{c1} - t_{c0}) \right] \quad (2.31)$$

$$y_2(\sigma_{21}, \sigma_{02}) = \frac{L_2}{\cos \alpha} \left[\left[\left(\frac{\sigma_{21}}{E} - \frac{D_{21}}{\sigma_{21}^2} \right) - \left(\frac{\sigma_{02}}{E} - \frac{D_{02}}{\sigma_{02}^2} \right) \right] + \alpha_t (t_{c1} - t_{c0}) \right]$$

горизонтальная равнодействующая сила в узле крепления оттяжек:

$$\begin{aligned} H_{r1}(\sigma_{11}, \sigma_{13}) &= (\sigma_{11} - \sigma_{13}) A \cos \beta \\ H_{r2}(\sigma_{21}, \sigma_{23}) &= (\sigma_{21} - \sigma_{23}) A \cos \alpha \end{aligned} \quad (2.32)$$

где: H_{r1}, H_{r2} – удерживающая сила в узлах крепления оттяжек 1-го и 2-го уровня;

$\sigma_{01}, \sigma_{11}, \sigma_{02}, \sigma_{21}$ – напряжение в оттяжках в начальном и конечном состоянии 1-го и 2-го уровня;

y_1, y_2 – перемещение 1-го и 2-го узла от удлинения оттяжек по горизонтали;

β, α – углы наклона оттяжек 1-го и 2-го уровня к горизонтали;

$t_{c1} - t_{c0}$ – разница температур нити между конечным и начальным состояниями;

$t_{s1} - t_{s0}$ – разница температур ствола между конечным и начальным состояниями.

D_{01}, D_{02} и $D_{11}, D_{13}, D_{21}, D_{23}$ – параметры, учитывающие увеличение длины нити за счет провисания от распределенной нагрузки на нить, в начальном и конечном состояниях для двух уровней:

$$D_i = \frac{\gamma_i^2 \cdot L_{1(2)}^2}{24}, \quad D_{01} = \frac{\gamma_{01}^2 \cdot L_1^2}{24}, \quad D_{02} = \frac{\gamma_{02}^2 \cdot L_2^2}{24}$$

где L_1 – длина хорды оттяжки 1-го уровня, м;

L_2 – длина хорды оттяжки 2-го уровня, м;

γ_i, γ_0 – приведенная нагрузка, отнесенная к единице площади поперечного сечения нити, Н/м³;

E – модуль упругости оттяжек.

Приведенная нагрузка, отнесенная к единице площади поперечного

сечения нити

– в начальном состоянии

$$\gamma_0 = \frac{g}{A}, \quad (2.33)$$

– в конечном состоянии для i -й оттяжки 1-го уровня

$$\gamma_1 = \frac{1}{A} \cdot \left[[g + G_1] \cdot \cos \beta + (-1)^{m+1} \cdot w_1 \cdot (\sin \beta)^2 \right], \quad (2.34)$$

в конечном состоянии для i -й оттяжки 2-го уровня

$$\gamma_2 = \frac{1}{A} \cdot \left[[g + G_2] \cdot \cos \alpha + (-1)^{m+1} \cdot w_2 \cdot (\sin \alpha)^2 \right] \quad (2.35)$$

где m - номер оттяжки в уровне

g – погонный вес оттяжки,

G_1, G_2 – распределенная нагрузка от веса гололедных отложений для 1-го и 2-го уровня оттяжек;

w_1, w_2 – ветровая нагрузка перпендикулярная хорде оттяжки;

β – угол наклона 1-го уровня оттяжек к горизонтали;

α – угол наклона 2-го уровня оттяжек к горизонтали.

2.1.2. Расчет усилий в стволе дымовой трубы

Расчетная схема дымовой трубы с оттяжками представляет собой вертикальную неразрезную балку, поддерживаемую системой предварительно-напряженных упругих оттяжек в двух уровнях и жестко заземленной в уровне фундамента. Расчет дымовой трубы выполняется в плоскости действия момента как сжато-изогнутого стержня. Конструкция дымовой трубы условно разбивается на расчетные участки, в пределах которых действует равномерно распределенная по длине ветровая нагрузка (рис. 2.5)

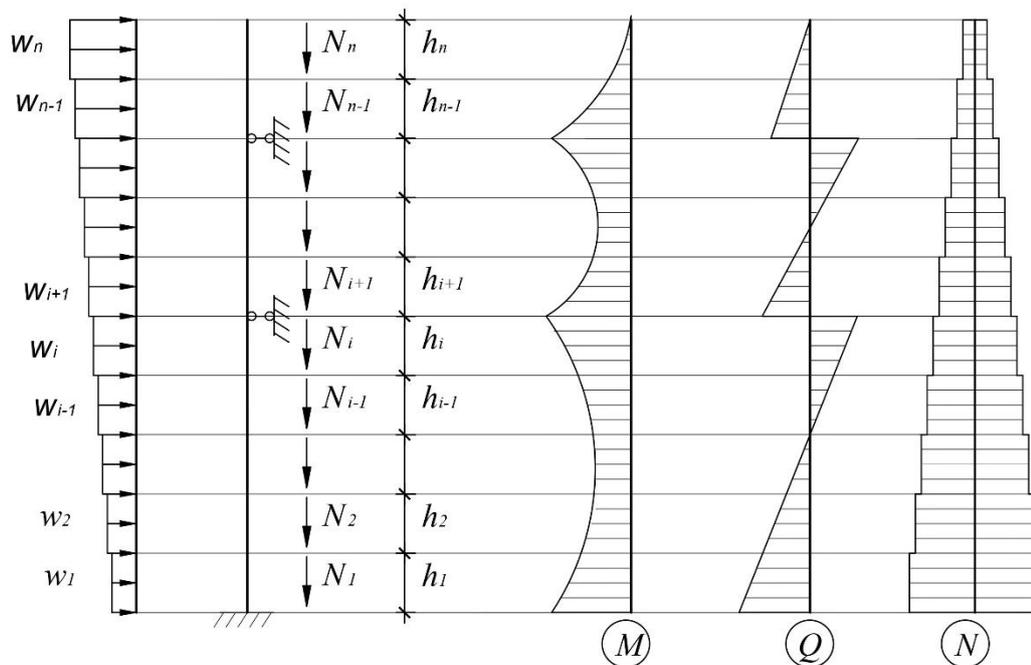


Рисунок 2.5 – Расчетная схема дымовой трубы в плоскости действия момента

Для составления основных зависимостей для ствола дымовой трубы можно воспользоваться методом сил. Основная система метода сил представлена на рисунке 2.6. Для статически неопределенной два раза системы записываем каноническое уравнение:

$$\begin{cases} \delta_{11} \cdot X_1 + \delta_{12} \cdot X_2 + \Delta_{1p} = 0 \\ \delta_{21} \cdot X_1 + \delta_{22} \cdot X_2 + \Delta_{2p} = 0 \end{cases} \quad (2.36)$$

где δ_{11} – единичное перемещение точки приложения реакции X_1 для основной системы;

δ_{12} – единичное перемещение точки приложения реакции X_2 от силы X_1 для основной системы;

δ_{21} – единичное перемещение точки приложения реакции X_1 от силы X_2 для основной системы;

δ_{22} – единичное перемещение точки приложения реакции X_2 для основной системы

X_1 – искомая реакция опоры 1-го уровня;

X_2 – искомая реакция опоры 2-го уровня;

Δ_{1p} – перемещение точки приложения реакции X_1 от действия внешних нагрузок для основной системы;

Δ_{2p} – перемещение точки приложения реакции X_2 от действия внешних нагрузок для основной системы;

При разном направлении единичной и внешней нагрузок грузовой коэффициент принимается отрицательным.

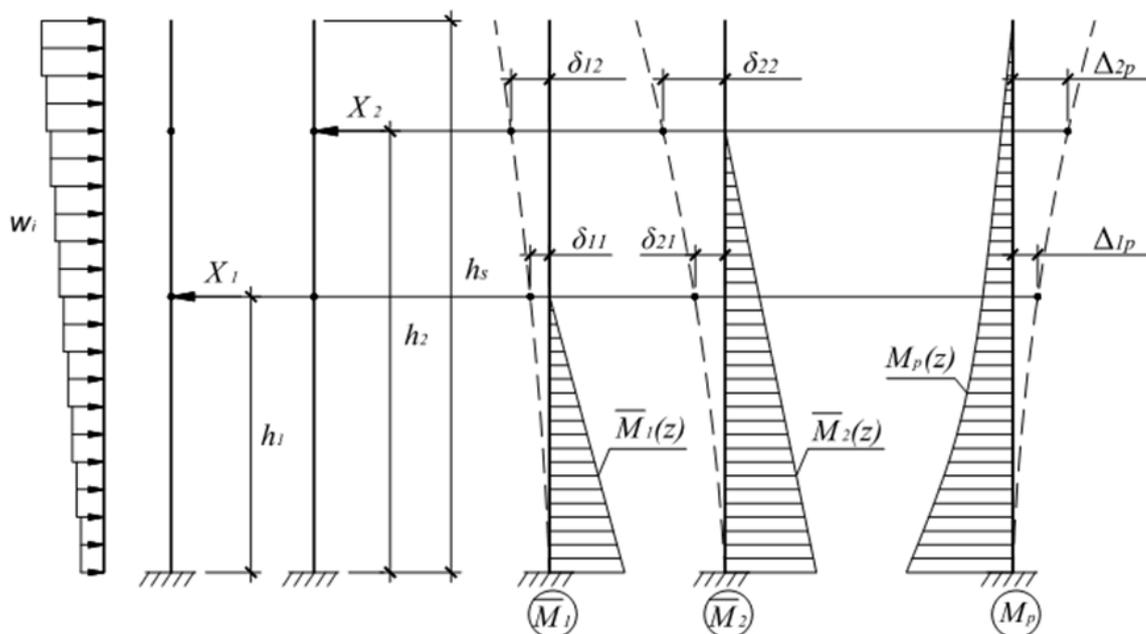


Рисунок 2.6 – Схема основной системы метода сил

Для определения единичного перемещения и перемещения от внешних нагрузок для основной системы можно воспользоваться формулой Мора.

$$\delta_{11} = \frac{1}{E_s} \int \frac{M_1 \cdot M_1}{I_{s1}} dx \quad (2.37)$$

$$\delta_{12} = \frac{1}{E_s} \int \frac{M_1 \cdot M_2}{I_{s1}} dx, \quad (2.38)$$

$$\delta_{12} = \delta_{21}$$

$$\delta_{22} = \frac{1}{E_s} \int \frac{M_2 \cdot M_2}{I_{s2}} dx \quad (2.39)$$

$$\Delta_{1p} = \frac{1}{E_s} \int \frac{M_1 \cdot M_p}{I_{s1}} dx \quad (2.40)$$

$$\Delta_{1p} = \frac{1}{E_s} \int \frac{M_1 \cdot M_p}{I_{s1}} dx \quad (2.41)$$

Выполняется суммирование перемещений участков ствола в зависимости от эпюр M_p и \bar{M}_1 от первого участка (у жесткого закрепления) до расчетного сечения участка ствола n_c , где закрепляются оттяжки.

Результирующая функция изгибающих моментов будет иметь вид

$$M(z) = \bar{M}_1(z) \cdot X_1 + \bar{M}_2(z) \cdot X_2 + M_p(z), \quad (2.42)$$

$\bar{M}_1(z)$ – функция изгибающих моментов от единичной силы, приложенной в уровне 1-й опоры;

$\bar{M}_2(z)$ – функция изгибающих моментов от единичной силы, приложенной в уровне 2-й опоры;

$M_p(z)$ – функция изгибающих моментов грузовой эпюры основной системы;

X_1, X_2 – реакций 1 и 2-й опоры, определяемая при решении уравнения (2.36).

При расчете ствола дымовой трубы на оттяжках необходимо учитывать дополнительные перемещения от удлинения оттяжек в двух уровнях (рис. 2.7). При этом реакция X_1 и X_2 принимается равной удерживающей силе узла крепления оттяжек H_{r1} и H_{r2} соответственно.

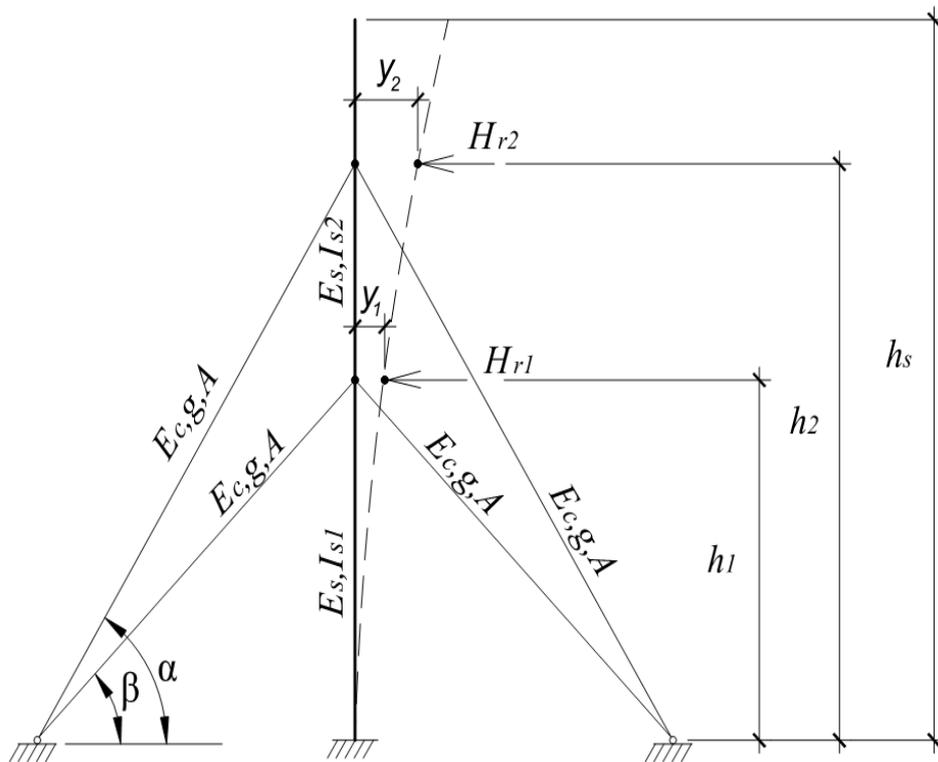


Рисунок 2.7 – Схема дымовой трубы с двумя уровнями оттяжек

При данных условиях уравнение метода сил (2.30) принимает вид

$$\begin{cases} \delta_{11} \cdot H_{r1} + \delta_{12} \cdot H_{r2} + \Delta_{1p} + y_1 = 0 \\ \delta_{21} \cdot H_{r1} + \delta_{22} \cdot H_{r2} + \Delta_{2p} + y_2 = 0 \end{cases} \quad (2.43)$$

где: δ_{11} – единичное перемещение точки приложения силы H_{r1}

δ_{12} – единичное перемещение точки приложения силы H_{r2} от силы H_{r1}

δ_{21} – единичное перемещение точки приложения силы H_{r1} от силы H_{r2}

δ_{22} – единичное перемещение точки приложения силы H_{r2}

H_{r1}, H_{r2} – удерживающая сила в узле крепления оттяжек 1-го и 2-го уровня;

Δ_{1p}, Δ_{2p} – перемещение узла крепления оттяжек 1-го и 2-го уровня от действия внешних нагрузок;

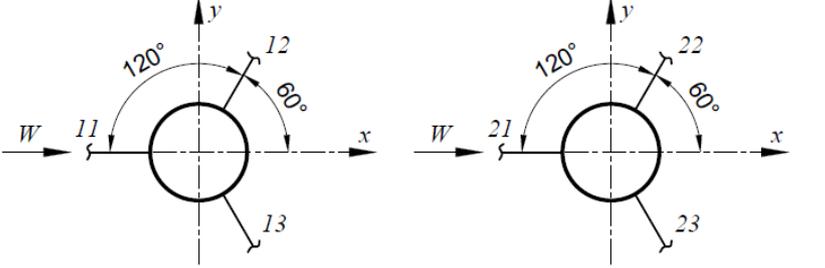
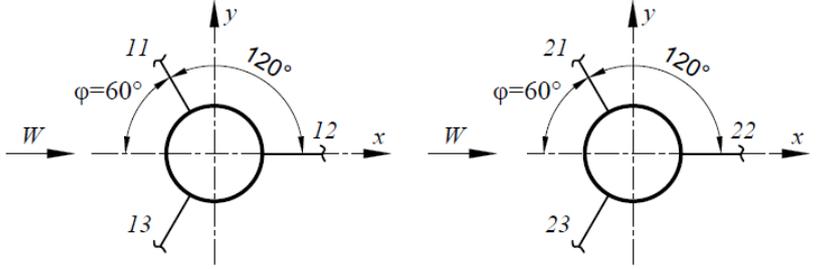
y_1, y_2 – перемещение 1-го и 2-го узла от удлинения оттяжек;

Перемещение узла крепления оттяжек и удерживающая сила в узле являются параметрами системы уравнений равновесия оттяжек. Поэтому для определения этих параметров необходимо объединить каноническое уравнение метода сил (2.43) с системой уравнений для четырех оттяжек в узле

(2.29).

В таблицах 2.1 и 2.2 представлены системы уравнений, связывающие уравнение равновесия сил в узле и совместности деформаций (составление канонических уравнений метода сил для статически неопределимой системы) для плоской системы с уч'том направления ветровой нагрузки (рис.2.7).

Таблица 2.1 – Системы уравнений для расчета дымовой трубы с тремя оттяжками в лацменном узле

1	Направление действия ветра в плоскости оттяжек ($\varphi = 0^\circ$)	
1.1	Схема сечения ствола трубы	
1.2	Система уравнений для расчета	$\begin{cases} \delta_{11} \cdot H_{r1}(\sigma_{11}, \sigma_{12}) + \delta_{12} \cdot H_{r2}(\sigma_{21}, \sigma_{22}) + \Delta_{1p} + y_1(\sigma_{11}, \sigma_{01}) = 0 \\ \delta_{21} \cdot H_{r1}(\sigma_{11}, \sigma_{12}) + \delta_{22} \cdot H_{r2}(\sigma_{21}, \sigma_{22}) + \Delta_{2p} + y_2(\sigma_{21}, \sigma_{02}) = 0 \\ E(\sigma_{11}, \sigma_{01}) = -E(\sigma_{12}, \sigma_{01}) \cdot \cos 60^\circ \\ E(\sigma_{21}, \sigma_{02}) = -E(\sigma_{22}, \sigma_{02}) \cdot \cos 60^\circ \end{cases}$
1.3	Горизонтальная равнодействующая сила в узле крепления оттяжек	$H_{r1}(\sigma_{11}, \sigma_{12}) = (\sigma_{11} - 2 \cdot \sigma_{12} \cdot \cos 60^\circ) A \cos \beta$ $H_{r2}(\sigma_{21}, \sigma_{22}) = (\sigma_{21} - 2 \cdot \sigma_{22} \cdot \cos 60^\circ) A \cos \alpha$
2	Направление действия ветра по биссектрисе угла между оттяжками ($\varphi = 60^\circ$)	
2.1	Схема сечения ствола трубы	

2.2	Система уравнений для расчета	$\begin{cases} \delta_{11} \cdot H_{r1}(\sigma_{11}, \sigma_{12}) + \delta_{12} \cdot H_{r2}(\sigma_{21}, \sigma_{22}) + \Delta_{1p} + y_1(\sigma_{11}, \sigma_{01}) = 0 \\ \delta_{21} \cdot H_{r1}(\sigma_{11}, \sigma_{12}) + \delta_{22} \cdot H_{r2}(\sigma_{21}, \sigma_{22}) + \Delta_{2p} + y_2(\sigma_{21}, \sigma_{02}) = 0 \\ E(\sigma_{11}, \sigma_{01}) \cdot \cos \varphi = -E(\sigma_{12}, \sigma_{01}) \\ E(\sigma_{21}, \sigma_{02}) \cdot \cos \varphi = -E(\sigma_{22}, \sigma_{02}) \end{cases}$
2.3	Горизонтальная равнодействующая сила в узле крепления оттяжек	$H_{r1}(\sigma_{11}, \sigma_{12}) = (2 \cdot \sigma_{11} \cdot \cos \varphi - \sigma_{12}) A \cos \beta$ $H_{r2}(\sigma_{21}, \sigma_{22}) = (2 \cdot \sigma_{21} \cdot \cos \varphi - \sigma_{22}) A \cos \alpha$
3	Направление действия ветра перпендикулярно плоскости оттяжки ($\varphi = 30^\circ$)	
3.1	Схема сечения ствола трубы	
3.2	Система уравнений для расчета	$\begin{cases} \delta_{11} \cdot H_{r1}(\sigma_{11}, \sigma_{12}) + \delta_{12} \cdot H_{r2}(\sigma_{21}, \sigma_{22}) + \Delta_{1p} + y_1(\sigma_{11}, \sigma_{01}) = 0 \\ \delta_{21} \cdot H_{r1}(\sigma_{11}, \sigma_{12}) + \delta_{22} \cdot H_{r2}(\sigma_{21}, \sigma_{22}) + \Delta_{2p} + y_2(\sigma_{21}, \sigma_{02}) = 0 \\ E(\sigma_{11}, \sigma_{01}) \cdot \cos \varphi = -E(\sigma_{12}, \sigma_{01}) \cdot \cos \varphi \\ E(\sigma_{21}, \sigma_{02}) \cdot \cos \varphi = -E(\sigma_{22}, \sigma_{02}) \cdot \cos \varphi \end{cases}$
3.3	Горизонтальная равнодействующая сила в узле крепления оттяжек	$H_{r1}(\sigma_{11}, \sigma_{12}) = (\sigma_{11} - \sigma_{12}) \cdot \cos \varphi \cdot A \cos \beta$ $H_{r2}(\sigma_{21}, \sigma_{22}) = (\sigma_{21} - \sigma_{22}) \cdot \cos \varphi \cdot A \cos \alpha$

Таблица 2.2 – Системы уравнений для расчета дымовой трубы с четырьмя оттяжками в в лацменном узле

1	Направление действия ветра в плоскости оттяжек ($\varphi = 0^\circ$)	
1.1	Схема сечения ствола трубы	

1.2	Система уравнений для расчета	$\begin{cases} \delta_{11} \cdot H_{r1}(\sigma_{11}, \sigma_{13}) + \delta_{12} \cdot H_{r2}(\sigma_{21}, \sigma_{23}) + \Delta_{1p} + y_1(\sigma_{11}, \sigma_{01}) = 0 \\ \delta_{21} \cdot H_{r1}(\sigma_{11}, \sigma_{13}) + \delta_{22} \cdot H_{r2}(\sigma_{21}, \sigma_{23}) + \Delta_{2p} + y_2(\sigma_{21}, \sigma_{02}) = 0 \\ E(\sigma_{11}, \sigma_{01}) = -E(\sigma_{13}, \sigma_{01}) \\ E(\sigma_{21}, \sigma_{02}) = -E(\sigma_{13}, \sigma_{02}) \end{cases}$
1.3	Горизонтальная равнодействующая сила в узле крепления оттяжек	$H_{r1}(\sigma_{11}, \sigma_{13}) = (\sigma_{11} - \sigma_{13}) A \cos \beta$ $H_{r2}(\sigma_{21}, \sigma_{23}) = (\sigma_{21} - \sigma_{23}) A \cos \alpha$
2	Направление действия ветра по биссектрисе угла между оттяжками ($\varphi = 45^\circ$)	
2.1	Схема сечения ствола трубы	
2.2	Система уравнений для расчета	$\begin{cases} \delta_{11} \cdot H_{r1}(\sigma_{11}, \sigma_{12}) + \delta_{12} \cdot H_{r2}(\sigma_{21}, \sigma_{22}) + \Delta_{1p} + y_1(\sigma_{11}, \sigma_{01}) = 0 \\ \delta_{21} \cdot H_{r1}(\sigma_{11}, \sigma_{12}) + \delta_{22} \cdot H_{r2}(\sigma_{21}, \sigma_{22}) + \Delta_{2p} + y_2(\sigma_{21}, \sigma_{02}) = 0 \\ E(\sigma_{11}, \sigma_{01}) \cdot \cos \varphi = -E(\sigma_{12}, \sigma_{01}) \cdot \cos \varphi \\ E(\sigma_{21}, \sigma_{02}) \cdot \cos \varphi = -E(\sigma_{22}, \sigma_{02}) \cdot \cos \varphi \end{cases}$
2.3	Горизонтальная равнодействующая сила в узле крепления оттяжек	$H_{r1}(\sigma_{11}, \sigma_{12}) = 2(\sigma_{11} - \sigma_{12}) \cdot \cos \varphi \cdot A \cos \beta$ $H_{r2}(\sigma_{21}, \sigma_{22}) = 2(\sigma_{21} - \sigma_{22}) \cdot \cos \varphi \cdot A \cos \alpha$

где относительная деформация для 1-го и 2-го уровня оттяжек:

$$E(\sigma_{1(m)}, \sigma_{01}) = \left[\left(\frac{\sigma_{1(m)}}{E_c} - \frac{D_{1(m)}}{\sigma_{1(m)}^2} \right) - \left(\frac{\sigma_{01}}{E_c} - \frac{D_{01}}{\sigma_{01}^2} \right) \right] + \alpha_t (t_{c1} - t_{c0}) + \alpha_t (t_{s1} - t_{s0}) \cdot \sin \beta$$

$$E(\sigma_{2(m)}, \sigma_{02}) = \left[\left(\frac{\sigma_{2(m)}}{E_c} - \frac{D_{2(m)}}{\sigma_{2(m)}^2} \right) - \left(\frac{\sigma_{02}}{E_c} - \frac{D_{02}}{\sigma_{02}^2} \right) \right] + \alpha_t (t_{c1} - t_{c0}) + \alpha_t (t_{s1} - t_{s0}) \cdot \sin \alpha$$

горизонтальное смещение узла крепления:

$$y_1(\sigma_{11}, \sigma_{01}) = \frac{L_1}{\cos \beta \cdot \cos \varphi} \left[\left[\left(\frac{\sigma_{11}}{E_c} - \frac{D_{11}}{\sigma_{11}^2} \right) - \left(\frac{\sigma_{01}}{E_c} - \frac{D_{01}}{\sigma_{01}^2} \right) \right] + \alpha_t (t_{c1} - t_{c0}) \right]$$

$$y_2(\sigma_{21}, \sigma_{02}) = \frac{L_2}{\cos \alpha \cdot \cos \varphi} \left[\left[\left(\frac{\sigma_{21}}{E_c} - \frac{D_{21}}{\sigma_{21}^2} \right) - \left(\frac{\sigma_{02}}{E_c} - \frac{D_{02}}{\sigma_{02}^2} \right) \right] + \alpha_t(t_{c1} - t_{c0}) \right]$$

где: m - номер оттяжки в уровне;

$\delta_{11}, \delta_{12}, \delta_{21}, \delta_{22}$ – единичные перемещения точек приложения сил H_{r1} и H_{r2}

Δ_{1p}, Δ_{2p} – перемещение узлов крепления оттяжек от действия внешних нагрузок;

$\sigma_{01}, \sigma_{11}, \sigma_{02}, \sigma_{21}$ – напряжение в оттяжках в начальном и конечном состоянии 1-го и 2-го уровня;

y_1, y_2 – перемещение 1-го и 2-го узла от удлинения оттяжек по горизонтали;

φ – угол между направлением ветрового потока и первой оттяжкой (в двух уровнях).

β, α – углы наклона оттяжек 1-го и 2-го уровня к горизонтали;

D_{01}, D_{02} и $D_{1(m)}, D_{2(m)}$ – коэффициенты, учитывающие влияние распределенной нагрузки на оттяжки в начальном и конечном состоянии:

$$D_{01} = \frac{\gamma_{01}^2 \cdot L_1^2}{24}, \quad D_{02} = \frac{\gamma_{02}^2 \cdot L_2^2}{24}, \quad D_{1(m)} = \frac{\gamma_{1(m)}^2 \cdot L_1^2}{24}, \quad D_{2(m)} = \frac{\gamma_{2(m)}^2 \cdot L_2^2}{24},$$

L_1, L_2 – длина хорды оттяжки 1-го и 2-го уровня, м;

$\gamma_{1(m)}, \gamma_{2(m)}, \gamma_{01}, \gamma_{02}$ – приведенная нагрузка, отнесенная к единице площади поперечного сечения нити, Н/м³;

Результирующая функция изгибающих моментов аналогично (2.42)

$$M(z) = \bar{M}_1(z) \cdot H_{r1} + \bar{M}_2(z) \cdot H_{r2} + M_p(z), \quad (2.44)$$

где z – координата высоты дымовой трубы;

$\bar{M}_1(z), \bar{M}_2(z), M_p(z)$ – функция изгибающих моментов от единичных сил, приложенных в уровне опор, и моментов грузовой эпюры основной системы

При определении продольных сил необходимо учитывать вертикальную силу в узле крепления оттяжек от напряжения в оттяжках:

– для 1-го уровня

$$V_{r1} = (\sigma_{11} + \sigma_{13}) \cdot A \cdot \sin \beta, \quad (2.45)$$

– для 2-го уровня

$$V_{r2} = (\sigma_{21} + \sigma_{23}) \cdot A \cdot \sin \alpha, \quad (2.46)$$

A – площадь поперечного сечения нити.

2.1.3 Расчет дымовой трубы с двумя уровнями оттяжек

Для анализа напряженно-деформированного состояния стальной дымовой трубы с оттяжками расчет выполнен по расчетным сочетаниям нагрузок: ветровая нагрузка при среднегодовой температуре воздуха с учётом и без технологического нагрева ствола; ветровая нагрузка при температуре теплого периода года (+40°C) с учётом и без технологического нагрева ствола; ветровая нагрузка при температуре холодного периода года (-40°C) с учётом и без технологического нагрева ствола; гололёдно-ветровая нагрузка и соответствующее температурное воздействие с учётом и без нагрева ствола; отсутствие ветра и температура ±40°C (для расчета монтажных натяжений).

В литературных источниках при расчете высотных сооружений предлагается рассматривать 3 направления ветра для трех оттяжек в узле и 2 направления ветра для четырёх оттяжек [25, 11]. С целью сокращения трудоемкости расчетов задачей данного исследования является установление критических расчетных направлений ветра. Рассмотрим оттяжечный узел дымовой трубы с тремя и четырьмя оттяжками в плане.

В качестве объекта исследования принята дымовая труба с футеровкой высотой 100 м с двумя уровнями оттяжек, расположенная в г. Донецке. Диаметр трубы составляет 3,0 м с толщиной стенки 8 мм до +50,0 м и 6 мм на отм. +50,00 до +100,00 м. В пространстве труба раскреплена оттяжками в 2-х уровнях на высоте 50,0 м и 80,0 м. Расположение оттяжек принято в соответствии с [2]. Наклон оттяжек к горизонтальной плоскости составляет для 1-го уровня 45°, для 2-го - 58°. Схема дымовой трубы с оттяжками изображена на рис. 2.8.

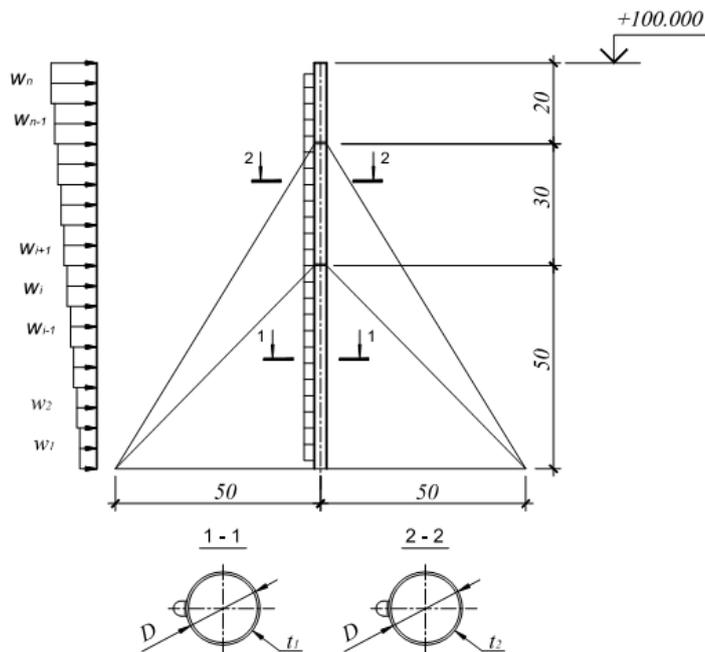


Рисунок 2.8 – Геометрическая схема трубы

Для выполнения численных исследований разработан программный комплекс статического расчета, на основании прямого численного решения системы нелинейных уравнений. Программный модуль реализован в среде MathCAD, который легко позволяет выполнить необходимые расчетные циклы.

По результатам расчета дымовой трубы на оттяжках вычислены максимальные усилия в стволе и напряжения в оттяжках для различных вариантов расчетных сочетаний нагрузок. Проверяется прочность оттяжек при заданном предварительном натяжении и воздействии нагрузок. Допускаемое усилие в тросе определяется с учетом коэффициента запаса, который принимается равным 2,5 [76; 121].

Согласно рис. 2.9, 2.10, максимальные напряжения в оттяжках возникают при ветровой нагрузки на оттяжку в холодный период года при нагреве ствола. Напряжения в наветренных оттяжках 1-го и 2-го уровня с четырьмя оттяжками в плане больше на 3-4%, чем с тремя оттяжками.

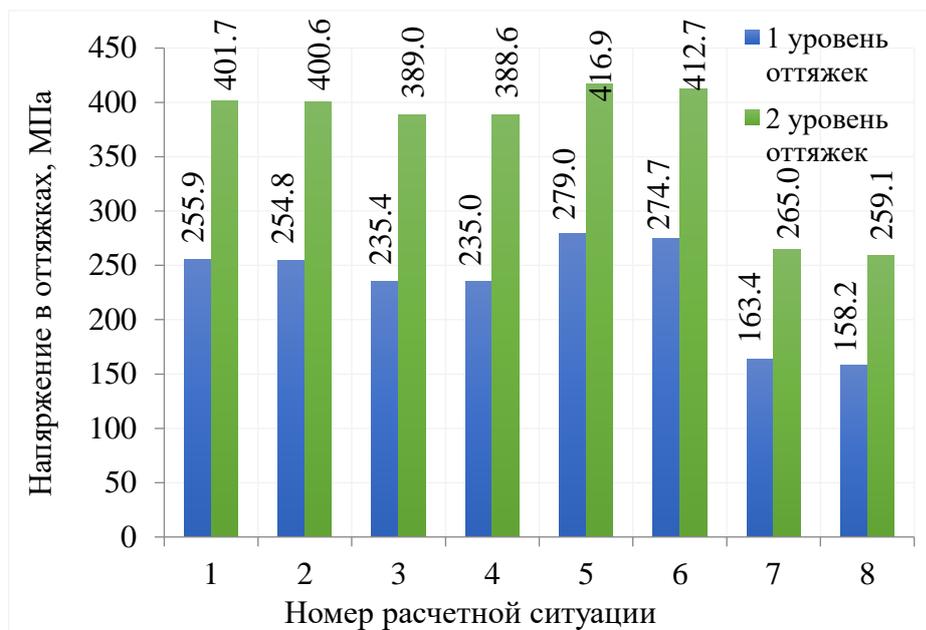


Рисунок 2.9 – Напряжения в наветренных оттяжках 1 и 2-го уровня с тремя оттяжками в плане.

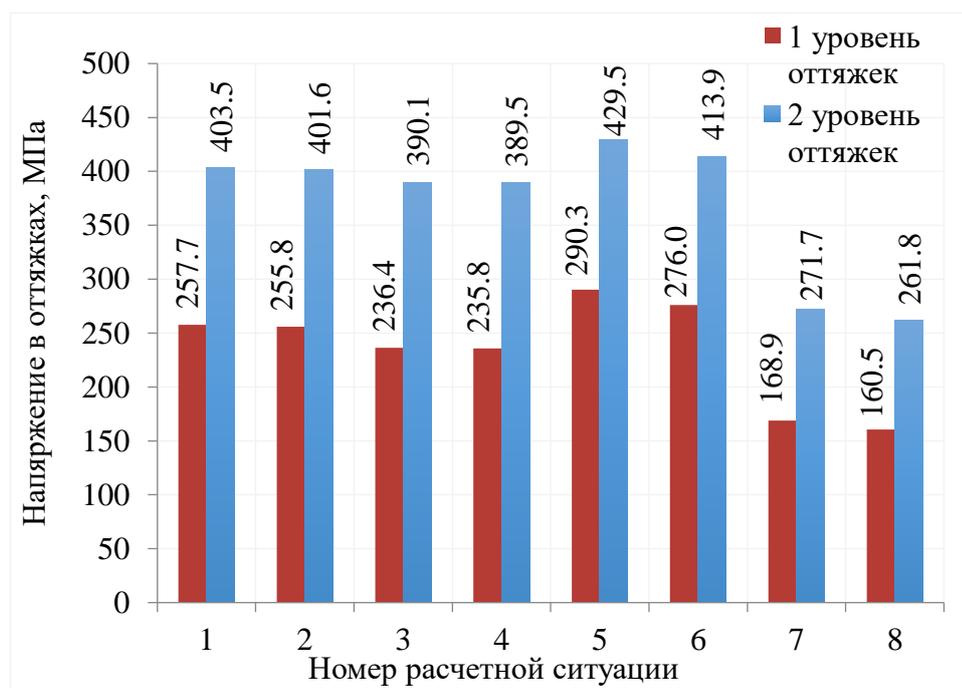


Рисунок 2.10 – Напряжения в наветренных оттяжках 1 и 2-го уровня с четырьмя оттяжками в плане.

Максимальные изгибающие моменты в стволе дымовой трубы возникают при действии ветровой нагрузки на оттяжку оттяжками (рис. 2.10, 2.11).

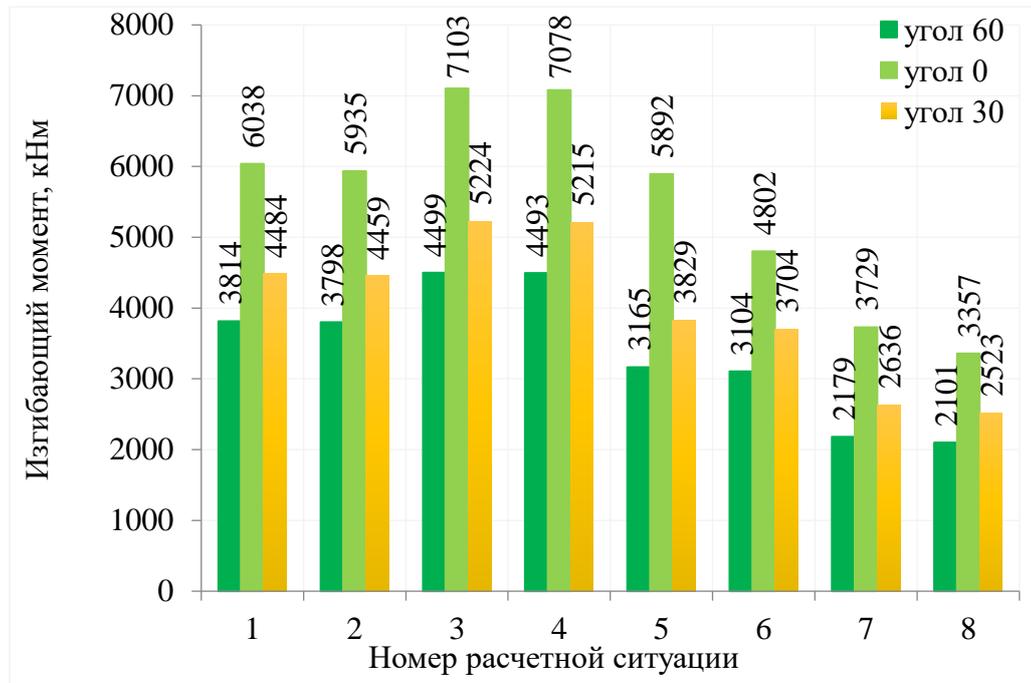


Рисунок 2.11 – Максимальные изгибающие моменты в стволе дымовой трубы с тремя оттяжками при различных углах действия ветра

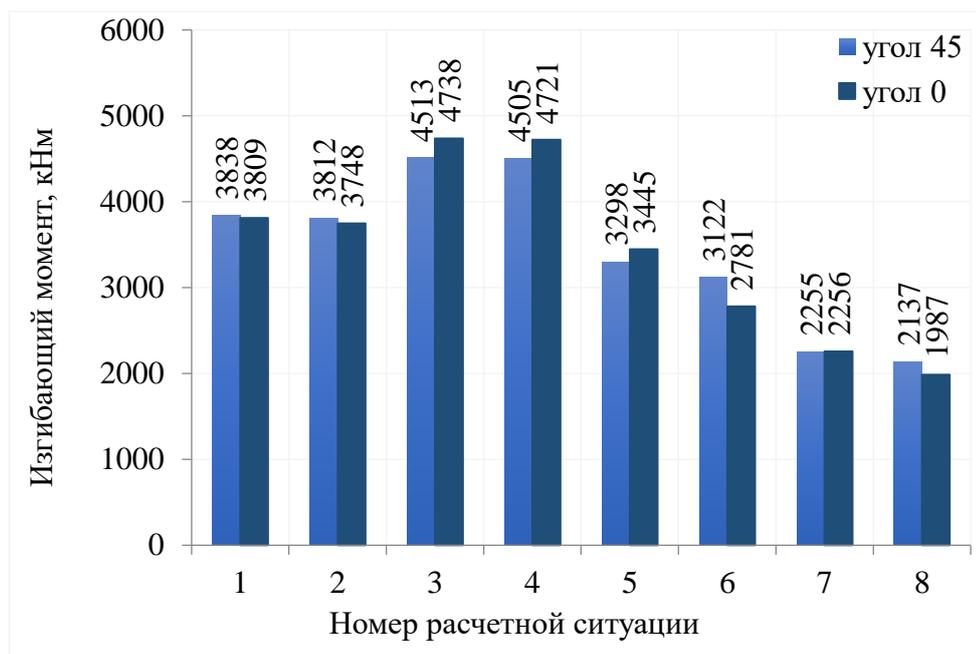


Рисунок 2.12 – Максимальные изгибающие моменты в стволе дымовой трубы с четырьмя оттяжками при различных углах действия ветра

Анализ диаграмм на рис. 2.11 - 2.13 показал, что максимальные усилия в стволе возникают при ветровой нагрузке на оттяжку и температуре теплого периода года, без технологического нагрева ствола трубы. При данном сочетании изгибающий момент в основании трубы с четырьмя оттяжками в плане меньше на 34 %, а напряжение на 26%, чем в стволе с тремя оттяжками.

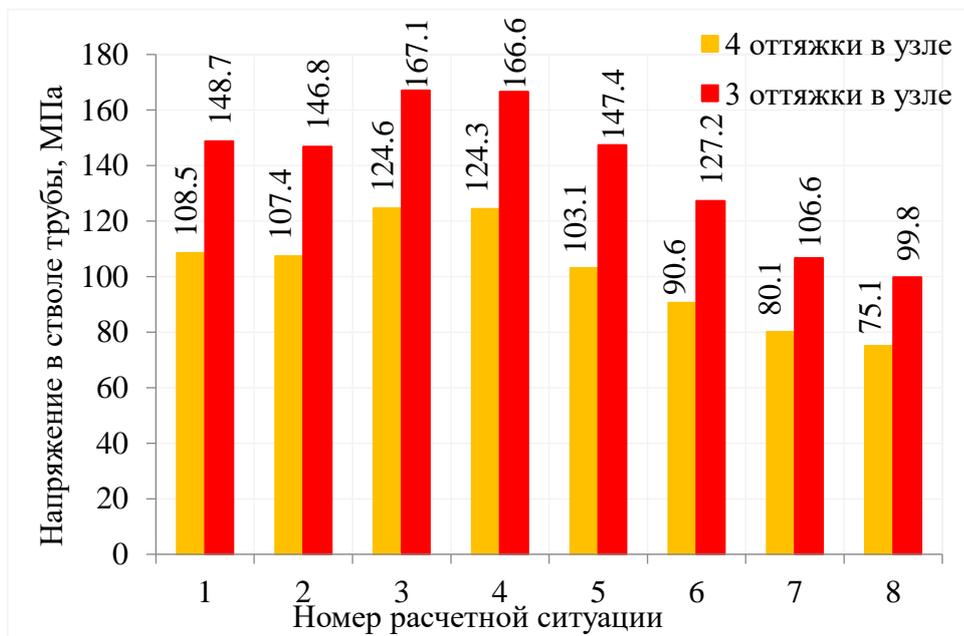


Рисунок 2.13. – Напряжение в стволе дымовой трубы по расчетным сочетаниям нагрузок с тремя и четырьмя оттяжками при действии ветра по биссектрисе

В дальнейшем при расчетах рассматривается направление ветра на оттяжку, как для трех, так и для четырёх оттяжек в плане.

Таким образом, на основании проведения численных исследований дымовой трубы с оттяжками получены следующие результаты, относительно расчетных сочетаний нагрузок:

- максимальные напряжения в оттяжках возникают при сочетании ветровой нагрузки, действующей в плоскости оттяжки, в холодный период года при нагреве ствола;

- максимальные изгибающие моменты в стволе трубы возникают при сочетании ветровой нагрузки в плоскости оттяжки и температуры теплого периода года, без технологического нагрева ствола трубы – критическое сочетание нагрузок из условия деформативности конструкции;

- сочетания нагрузок гололед, ветер и отрицательная температура

воздуха не являются критическими из условия прочности оттяжек. Перемещения при данном сочетании нагрузок не превышают допустимые [111].

2.2 Особенности построения расчетной модели дымовой трубы в ПК LIRA-SAPR

В настоящее время с возможностью использования вычислительной техники, широкое применение нашли методы математического программирования. Данные методы рассматриваются авторами в работах [1, 8, 13, 22, 57, 71]. Методы математического программирования позволяют создавать прикладные методики расчетов конструкций и их узлов.

Для составления расчётных моделей сооружений на данный момент времени активно используются вычислительные программные комплексы, в основе которых лежит метод конечных элементов [91]. Программные комплексы автоматически определяют тип конечного элемента в зависимости от заданной расчетной модели. Смысл заключается в том, что конструктивная схема разбивается на отдельные элементы, имеющие свои постоянные в пределах элемента характеристики: жесткостные характеристики и комплекс нагрузок, приложенных к его (элемента) поверхности. Соединение элементов между собой осуществляется в узлах, закрепление расчетной схемы в пространстве производится путем установки связей.

Программным комплексом предусмотрены универсальные конечные элементы предназначены для расчета тонких пологих оболочек. Каждый узел конечных элементов имеет по шесть степеней свободы:

- U, V, W – линейные перемещения по осям X, Y и Z ;
- угол поворота относительно оси OX , положительное направление которого противоположно направлению вращения часовой стрелки, если смотреть с конца оси;
- угол поворота относительно оси OY , положительное направление которого противоположно направлению вращения часовой стрелки, если смотреть с конца оси;

- угол поворота относительно OZ.

Степени свободы U, V отвечают мембранным, а W, UX, UY – изгибным деформациям. Угол поворота UZ в местной системе координат элемента всегда равен нулю. Он вводится для стыковки элементов, не лежащих в одно

Для выбора типа конечного элемента выполнен статический расчет конструкции стальной дымовой трубы высотой 32,8 м. (рис. 2.14) с помощью программного комплекса ПК LIRA-SAPR.

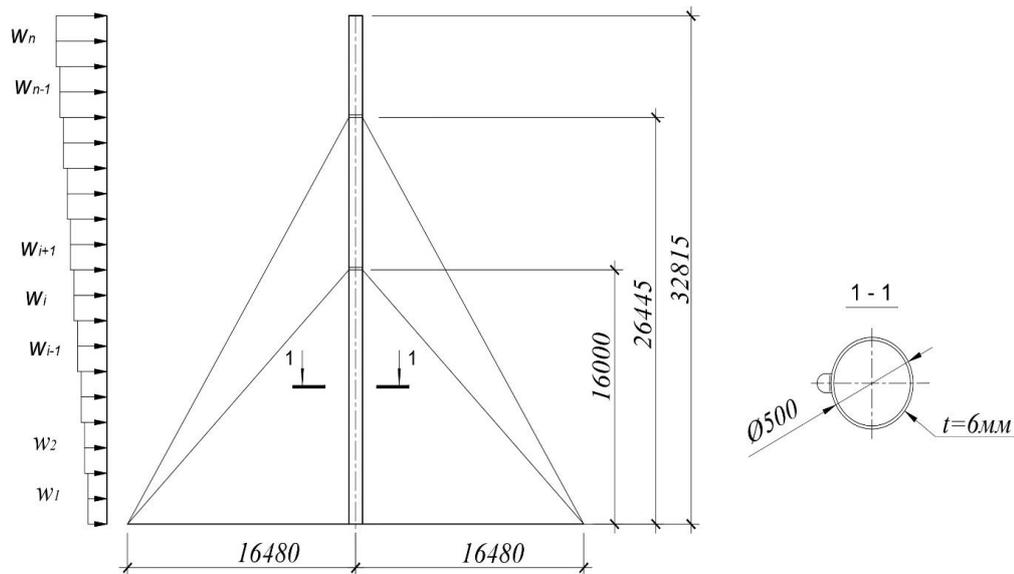


Рисунок 2.14 – Общая геометрическая схема исследуемой стальной дымовой трубы

Расчетная схема стальной дымовой трубы выполнена двух типов:

- в виде сжато-изогнутого стержня, моделируется КЭ 10 (универсальный пространственный стержень) (рис. 2.15а);
- в виде конечного элемента оболочки, моделируется пластинами КЭ 41, 42, (универсальные прямоугольные, треугольные оболочки) (рис. 2.15б).

Оттяжки для двух типов моделируются в пространственной схеме нелинейным стержнем КЭ 310 (нить), а для предварительного натяжения в зоне нижних опорных узлов оттяжек используется КЭ 308.

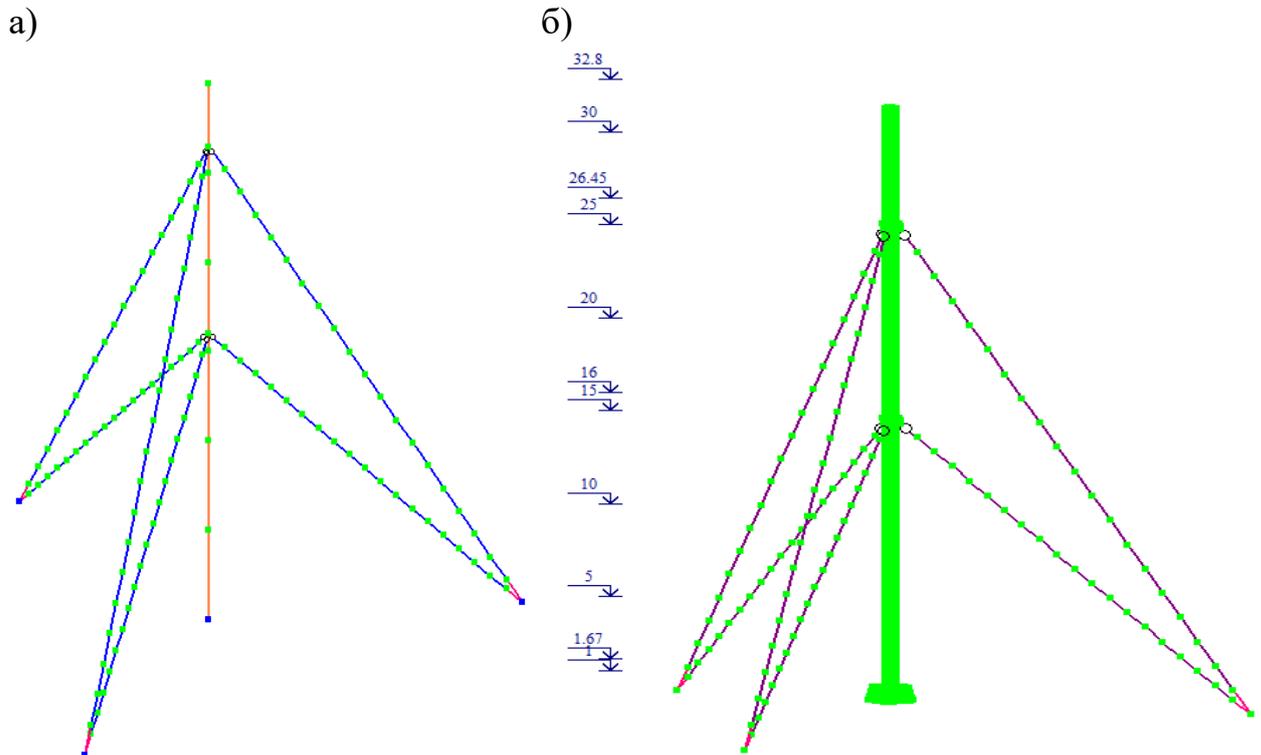


Рисунок 2.15 – Расчетная модель стальной дымовой трубы в ПК LIRA-SAPR:
 а) в виде стержня КЭ 10; б) в виде оболочки КЭ 41

Для расчета оболочек возможно использовать следующие типы конечных элементов:

- универсальный стержень (тип КЭ 10);
- прямоугольная оболочка (тип КЭ 41);
- треугольная оболочка (тип КЭ 42);
- четырехугольная оболочка (тип КЭ 44);

Порядок задания первых узлов элементов приведен на рисунке 2.16.

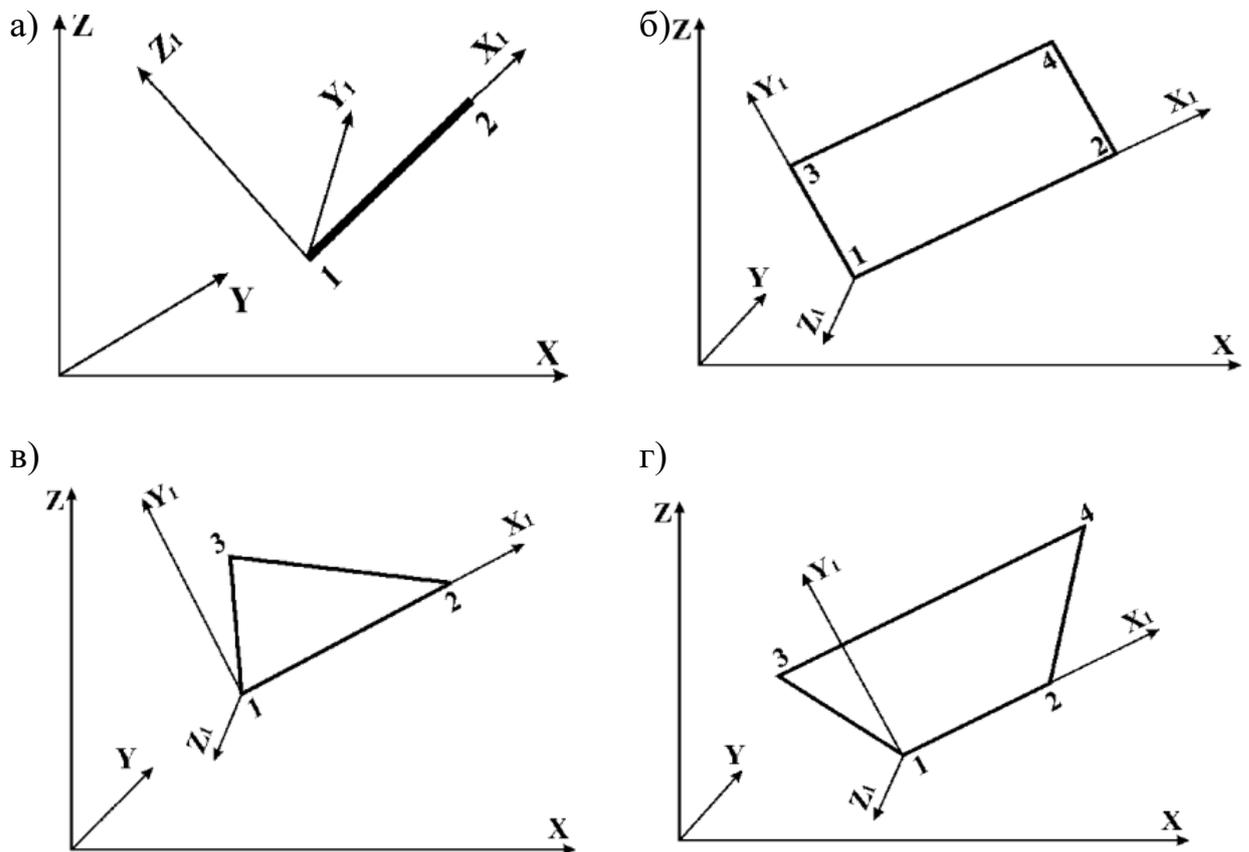


Рисунок 2.16 – Конечные элементы в ПК LIRA-SAPR: а) универсальный стержень (КЭ 10), б) универсальный прямоугольный элемент оболочки (КЭ 41); в) универсальный треугольный элемент оболочки (КЭ 42); г) универсальный четырехугольный конечный элемент оболочки (КЭ 44)

Расчет выполняется в нелинейной постановке, при которой можно использовать три метода:

1. Простой шаговый – на каждом шаге решается линеаризованная задача, при которой жесткость оттяжек определяется при значении натяжения, полученного на предыдущем шаге.

2. Шаговый с итерационным уточнением – учитывает, что результат решения на каждом шаге может быть неточным и выполняется его итерационное уточнение, но жесткости все равно принимаются по предыдущему шагу.

3. Шагово-итерационный – отличается от предыдущего тем, что жесткости оттяжек пересчитываются на каждой итерации.

Общих рекомендаций по выбору метода не существует, и в сложных

случаях не стоит ограничиваться только одним методом.

В качестве расчетных значений приняты максимальные нормальные напряжения в уровне заделки ствола трубы, напряжение в оттяжках и перемещение верха ствола трубы. Выполненные численные расчеты показали, что при использовании ПК LIRA-SAPR (в виде стержня КЭ 10) нормальные напряжения больше на 9,8% по сравнению с результатами программного модуля MathCAD. Результаты верифицированных расчетов сведены в таблицу 2.3.

Таблица 2.3 – Сравнение результатов верифицированных расчетов

Результаты расчета	Усилия в стволе		Напряжения в стволе σ_{\max} , МПа			Напряжения в наветренных оттяжках		Перемещение верха ствола f , мм
	N, кН	M, кНм				$\sigma_{1 \text{ отт.}}$, кН	$\sigma_{2 \text{ отт.}}$, кН	
Аналитический расчет	45	23,5	25,5			33,4	52	24
Ствол-стержень КЭ 10	49,3	26	28			32	60	26,7
Отличие, %	10	13	9,8			4	15	10
Ствол-оболочка КЭ 41	-	-	$\sigma_x(\text{мер})$	$\sigma_y(\text{кол})$	σ_{ef}	35	62	30
			26	18	22			
Отличие, %	-	-	7,1	-	-	9	3,2	13

Для уточнения напряженно-деформированного состояния дымовой трубы с оттяжками в зоне примыкания оттяжек, ствол моделируется конечными элементами оболочками с детальным рассмотрением конструкции лацменного узла. Кольцевые ребра лацменного узла моделируются КЭ 44 (универсальные четырехугольные оболочки), ребра-проушины КЭ 41.

Значения приведенных напряжений (σ_{ef}) в оболочке определялись в ПК LIRA-SAPR для плоского напряженного состояния при известных главных напряжениях σ_x и σ_y по формуле:

$$\sigma_{ef} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x \sigma_y} \quad (2.47)$$

По результатам исследования модели-стержень и модели-оболочка расхождение напряжения в стволе трубы при соответствующей действующей нагрузки не превысила 7,1%. Таким образом, выбранная модель дымовой трубы оболочками в программном комплексе ПК LIRA-SAPR 2021 с учетом нелинейной работы оттяжек, позволяет определить кольцевые, меридиональные и приведенные напряжения в лацменных узлах дымовых труб. На рисунке 2.17 представлена модель лацменного узла. Структурные составляющие принятой конечно-элементной модели лацменного узла приведены в таблице 2.4

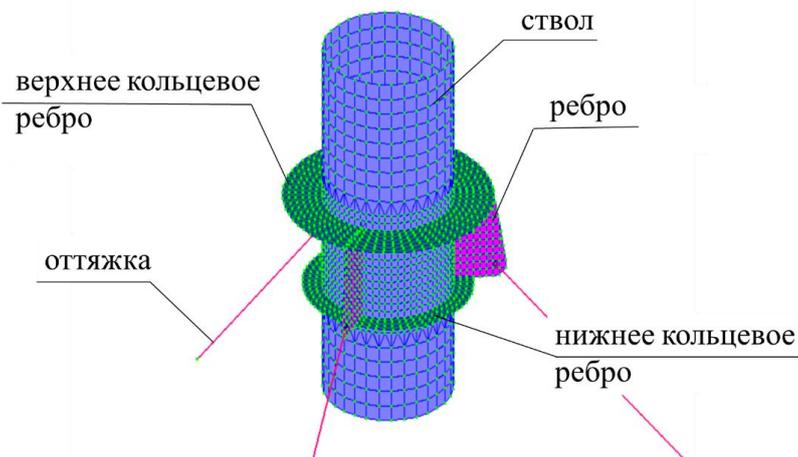
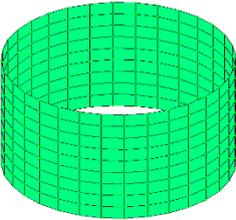
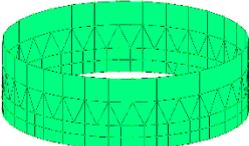
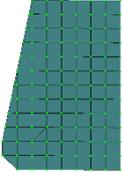
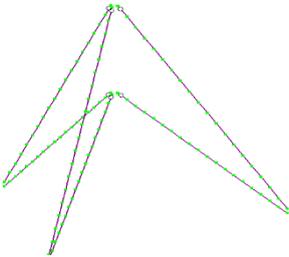
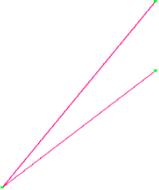
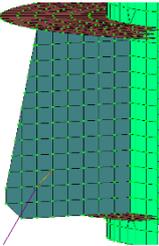


Рисунок 2.17 – Модель лацменного узла дымовой трубы

Таблица 2.4 – Структурные составляющие принятой конечно-элементной модели лацменного узла

Элемент модели	Графическое изображение	МКЭ ПК LIRA-SAPR
Ствол - оболочка		Прямоугольные пластины КЭ 41
		Треугольные пластины КЭ 42 – при изменении сетки пластины с 50x50мм до 25x25 мм в уровне лацменного узла

Верхнее кольцевое ребро		Четырехугольные пластины КЭ 44
Нижнее кольцевое ребро		Четырехугольные пластины КЭ 44
Ребро проушина		Прямоугольные пластины КЭ 41
Оттяжки		Геометрически нелинейный стержень КЭ 310 (нить) - позволяет задавать на канат необходимые нагрузки и воздействия
Оттяжки		Геометрически нелинейный КЭ 308 - для моделирования предварительного натяжения оттяжек 1-го и 2-го уровня
Крепление оттяжки к ребру проушине		Условное защемление оттяжки путем добавления стержня КЭ 10 и продление его в теле оболочки

2.3 Выводы по разделу II

1. Разработан программный модуль статического расчета стальных дымовых труб с тремя и четырьмя оттяжками в плане и двумя уровнями оттяжек по высоте, который позволяет вычислить усилия в стволе и напряжения в оттяжках для различных вариантов расчетного направления ветра и сочетаний нагрузок при наименьших затратах.

2. В результате проведения численных исследований определены критические расчетные ситуации нагрузок и воздействий для отдельных элементов конструкции:

- критическим расчетным направлением ветра для дымовых труб является направление ветра на оттяжку;

- сочетание нагрузок ветер и температура холодного периода года при нагреве ствола является критическим из условия прочности оттяжек;

- сочетание нагрузок ветер и температура теплого периода года является критическим из условия деформативности ствола;

- сочетание нагрузок гололед, ветер и отрицательная температура воздуха не являются критическими из условия прочности оттяжек.

3. Для определения НДС как сооружения в целом, так и отдельных узлов дымовой трубы, выбраны и обоснованы типы конечных элементов необходимые для использования при расчете конструкций в программно-вычислительном комплексе ПК LIRA-SAPR.

4. Проведен сравнительный анализ численных расчетов, выполненных с использованием программного комплекса LIRA-SAPR в виде стержня КЭ 10, и результатов, полученных с помощью программного модуля MathCAD. Результаты показали, что нормальные напряжения, полученные в ПК LIRA-SAPR, превышают результаты MathCAD на 9,8%.

РАЗДЕЛ III. НАТУРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СТАЛЬНЫХ ДЫМОВЫХ ТРУБ С ОТТЯЖКАМИ

Процесс эксплуатации промышленных сооружений происходит в условиях агрессивных воздействий, технологических процессов, а также различного вида работ по ремонту конструкций и замене технологического оборудования. В результате данного процесса появляются начальные дефекты и происходит постепенное накопление повреждений. Процесс накопления повреждений является главным фактором, снижающим надежность сооружений в процессе эксплуатации. Под повреждением понимают несовершенство конструкции, приобретенное в процессе эксплуатации. Дефекты характеризуют состояние конструкций перед началом эксплуатации и способствуют появлению повреждений. В свою очередь, появление и развитие повреждений напрямую зависит от срока и качества эксплуатации, вида воздействий [75]. Поэтому в данном разделе на основании проведения натурных исследований необходимо проанализировать и систематизировать процессы износа несущих конструкций дымовых труб на оттяжках. В результате износа и соответственно ухудшении конструктивных параметров происходит повышение напряжений в конструкции дымовой трубы с оттяжками. По своему воздействию на сооружение износ рассматривается как локальный, меняющий НДС отдельных элементов и узлов сооружения, и износ общий, меняющий НДС сооружения в целом.

3.1. Методика обследования стальных дымовых труб с оттяжками

Для обеспечения заданной долговечности высотного сооружения необходимо проведение своевременных обследований и диагностики состояния строительных конструкций. Для более точной оценки технического состояния дымовых труб с оттяжками необходимо выполнять обследование в соответствии с единой структурированной методикой. В данной методике учитываются конструктивные особенности, принцип работы и условия эксплуатации.

В данной работе разработана методика проведения натурных

обследований стальных дымовых труб с оттяжками, основанная на существующих методах обследования высотных сооружений и учитывающая специфические особенности сооружений. В основе методики рассматривается зонирование конструкций по разнородным составляющим с использованием системного подхода [31].

В методику входят правила выполнения измерений, требования к инструментальному и приборному обеспечению, правила обработки результатов измерений и т.д. Важным условием получения достоверности результатов является использование структурного последовательного описания конструкций, включающего составные элементы сооружения и показывающего их взаимосвязь.

Структурная схема стальных дымовых труб разрабатывается на основании анализа влияния конструктивных параметров; анализа взаимосвязи элементов в дымовых трубах; учета последовательности отказов элементов конструкции; опыта исследования повреждаемости конструкций и их элементов.

Схема для выполнения структурного описания конструкций дымовых труб с оттяжками и их зонирования представлена на рис. 3.1 [29, 41].

Стоит отметить, что важным фактором является наличие средств доступа в составе сооружений, которые крепятся к несущим конструкциям и обычно имеют более высокие показатели износа по сравнению с другими конструктивными элементами.

Также в структурной схеме отражается схематическое описание конструкций, которое следует учитывать при обследовании, зонировании конструкций по степени износа [80] и планировании технического обслуживания.

Зонирование конструкций представляет собой разбиение конструкций по уровням в нисходящем порядке. Уровень износа элементов нижнего уровня определяет не только состояние самих элементов, но и элементов более высокого уровня, которые конструктивно зависят от них.

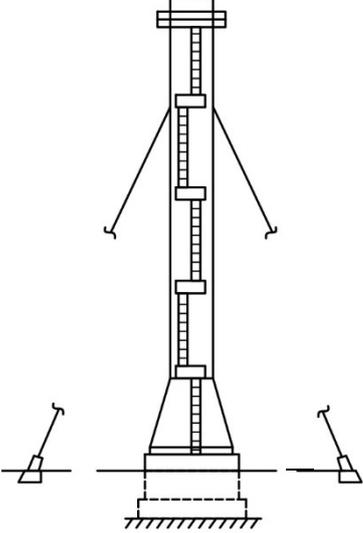
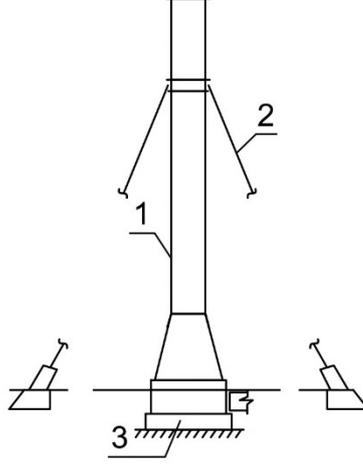
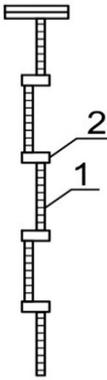


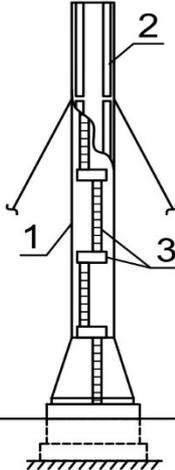
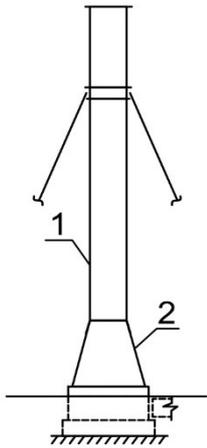
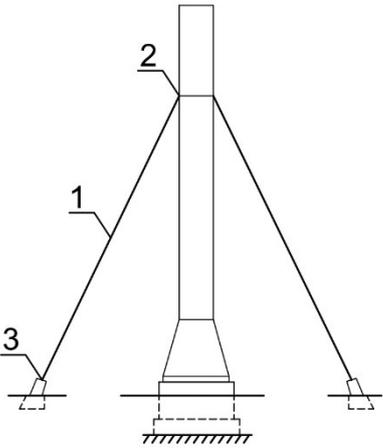
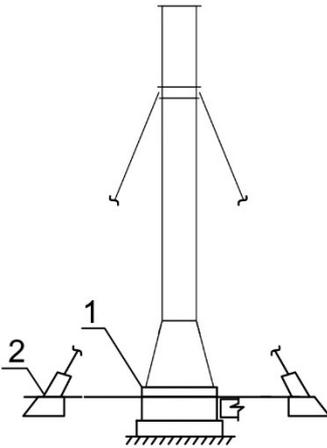
Рисунок 3.1 – Структурная схема и зонирование стальных дымовых труб с оттяжками для выполнения обслуживания.

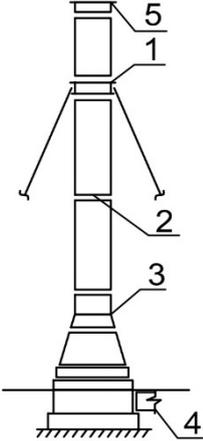
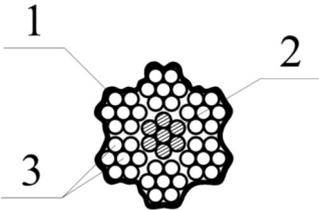
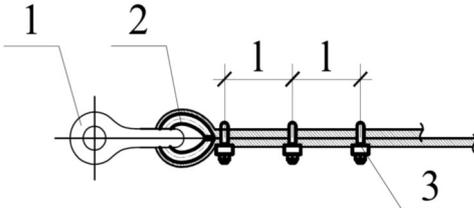
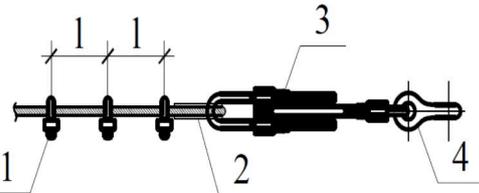
Данный подход следует учитывать и при выполнении диагностики технического состояния, вначале описывая состояние элементов низкого уровня, затем – более высокого уровня.

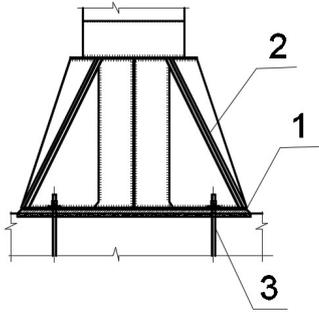
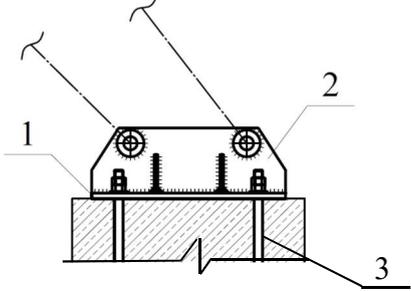
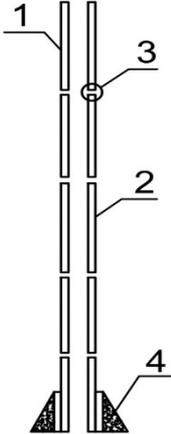
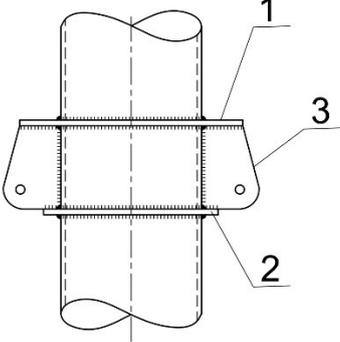
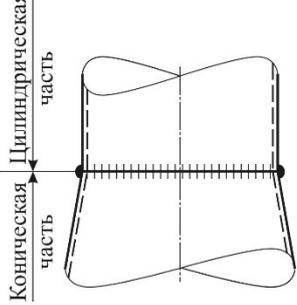
Основные типы элементов уровней зонирования стальных дымовых труб с оттяжками приведены в таблице 3.1.

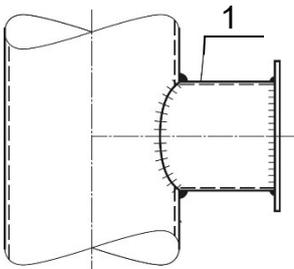
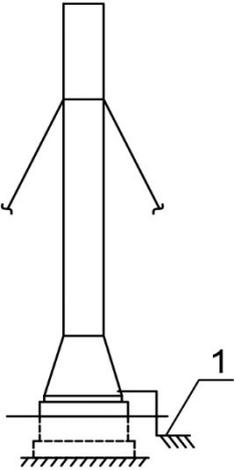
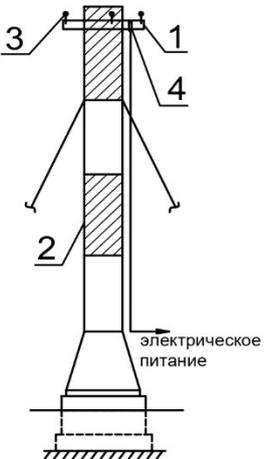
Таблица 3.1 – Основные элементы уровней зонирования

Уровень зоны	Наименование типа элемента системы	Схематическая модель	Наименование элемента
1	2	3	4
	Стальная дымовая труба с оттяжками		1. Несущие конструкции 2. Средства доступа 3. Дополнительные элементы
1	Несущие конструкции		1. Ствол 2. Оттяжки 3. Фундамент
1	Средства доступа		1. Лестницы 2. Площадки

1	Дополнительные элементы		<p>1. Гасители колебаний 2. Футеровка 3. Оборудование</p>
2	Ствол		<p>1. Цилиндрический ствол 2. Конический ствол (при наличии)</p>
2	Оттяжки		<p>1. Канат оттяжки 2. Верхнее крепление оттяжки 3. Нижнее крепление оттяжки</p>
2	Фундамент		<p>1. Конструкции фундамента ствола 2. Конструкции анкерного фундамента</p>

2.	Лестницы и площадки		Несущие и вспомогательные элементы
3	Цилиндрический ствол, конический ствол		<ol style="list-style-type: none"> 1. Лацменный узел 2. Узел сопряжения обечаек 3. Узел сопряжения цилиндрической и конической части 4. Узел примыкания газохода 5. Оголовок
3.	Канат оттяжки		<ol style="list-style-type: none"> 1. Защитное покрытие 2. Сердечник 3. Проволоки
3.	Верхнее крепление оттяжки		<ol style="list-style-type: none"> 1. Монтажная скоба 2. Коуш 3. Зажим
3.	Нижнее крепление оттяжки		<ol style="list-style-type: none"> 1. Зажим 2. Коуш 3. Натяжное устройство 4. Монтажная скоба

3.	Конструкции фундамента ствола		<p>1. Плита фундамента 2. Опорный соединительный элемент 3. Анкерный болт</p>
3.	Конструкции анкерного фундамента		<p>1. Плита фундамента 2. Элементы жесткости 3. Анкерный болт</p>
3	Футеровка		<p>1. Участок кладки 2. Кирпичные швы кладки 3. Узел опирания кладки на ствол 4. Засыпка</p>
3	Лацменный узел		<p>1. Верхнее кольцевое ребро 2. Нижнее кольцевое ребро 3. Ребро (проушина)</p>
3	Узел сопряжения цилиндрической и конической части		

3	Узел примыкания газохода		1. Патрубок газохода
4	Молние-защита		1. Заземление
4	Свето-ограждение		1. Ночное светоограждение 2. Дневное светоограждение 3. Фонари 4. Распределительное устройство

3.2. Натурные исследования дымовых труб

В рамках экспериментального исследования приняты результаты натурных обследований существующих дымовых труб на промышленных предприятиях и объектах энергетики Донецкой области, которые эксплуатируются с различными повреждениями. Такие повреждения снижают несущую способность дымовых труб и соответственно дальнейший срок эксплуатации сооружения. Исследуемые дымовые трубы приведены в табл. 3.2.

Обследование дымовых труб производится путём визуального осмотра.

Натурные размеры труб, размеры повреждений, расстояние между ними, а также глубину коррозионного поражения металлоконструкций измеряли с помощью линейных измерительных средств: измерительной линейки, рулетки, штангенциркуля, а также ультразвукового толщиномера с точностью измерений до 0,1 мм.

Для оценки величины отклонения оси ствола от вертикали по высоте дымовой трубы использовались результаты геодезических измерений с помощью теодолита 2Т5К.

Толщина металла в оболочке ствола определялась с помощью ультразвукового толщиномера УТ-98 «Скат» в 6 точках по высоте трубы. Места измерений расположены вдоль ходовой лестницы и по периметру трубы в нижней части. Поверхность ствола в месте контроля толщины стенки оболочки предварительно тщательно очищалась от пыли и продуктов коррозии.

Таблица 3.2 – Дымовые трубы, принятые в качестве объектов обследования

Номер объекта	Высота Н, м	Диаметр ствола d, м		Толщина ствола t, мм	Год эксплуатации	Город строительства
		конич. часть	цилинд. часть			
1	2	3	4	5	6	7
1	31,8	-	0,5	6	1998	Донецк
2	20	-	0,835	8/6	1978	Донецк
3	34,65		0,8	9	1995	Свердловск
4	75	2,82	5,03	12/10/8	1951	Донецк
5	75	2,82	5,03	12/10/8	1951	Донецк
6	40	-	0,92	10	1983	с.Покровское
7	27,75	-	2,5	10/6	1965	Мариуполь
8	21,5	-	0,325	10	2001	Донецк
9	39,1	-	2,5	7/5	1968	Мариуполь
10	39,1	-	2,5	7/5	1968	Мариуполь
11	25,7	1,12	0,82	12	1983	Донецк
12	45	3,42	2,24	10/8/6	1963	Донецк
13	35	2,8	1,5	10/8	1963	Мариуполь
14	35	-	1,0	10,8	1974	Макеевка

15	21	1,94	1,2	10	1966	Донецк
16	41,4	-	2,5	10	1973	Мариуполь
17	40	-	3,52	14/12/10/8	1960	Мариуполь
18	27,8	-	2,5	6	1970	Мариуполь
19	32	3	2,3	12	1960	Мариуполь
20	40	3,2	1,85	10/8	1963	Мариуполь
21	35	2,8	1,5	8/6	1963	Мариуполь
22	35	2,8	1,5	10/8/6	1965	Мариуполь
23	35	2,8	1,5	8/6	1965	Мариуполь
24	35	2,8	1,5	8/6	1964	Мариуполь
25	60,6	5,34	3,8	16/12	1965	Мариуполь
26	61	5,1	3,8	16/14/12/10	1965	Мариуполь
27	32,8	3,1	1,9	12/8/6	1935	Мариуполь
28	42,7	4,28	2,32	12/10/8	1935	Мариуполь
29	25,2	1,12	0,86	12/10	1965	Мариуполь
30	59,6	5,0	3,4	16/12/10/8	1978	Мариуполь
31	30	2,6	1,9	12/10	1935	Мариуполь
32	80	3,6	1,9	18/16/12	1935	Мариуполь

Согласно нормативным документам [51] дымовые трубы относят к сооружениям класса последствий (ответственности) СС2 и имеют ориентировочный срок эксплуатации 30 лет. Исходя из периода эксплуатации исследуемых дымовых труб, представленных на рис. 3.2, большая часть дымовых труб (около 80% из числа обследуемых) эксплуатируются с превышением своего срока службы.

На основании систематизации данных обследования 32-х дымовых труб, были определены наиболее часто встречающиеся повреждения.

Основные характерные места возникновения повреждений:

- фундаменты;
- несущая оболочка дымовых труб;
- узлы дымовых труб;
- вспомогательные элементы – площадки, ограждение, лестницы;
- оттяжки дымовых труб;
- огнеупорная футеровка.



Рисунок 3.2 – Период эксплуатации исследуемых дымовых труб

Количественная характеристика различных видов дефектов и повреждений стальных дымовых труб представлены на рисунке 3.3 (в процентном соотношении от общего количества обследуемых сооружений):

1. Разрушение элементов фундамента – 63%;
2. Эксцентриситет стыковки царг – 56%;
- 3 Коррозионный износ стенки ствола – 55%;
4. Локальный (неравномерный) коррозионный износ в узлах – 60%;
5. Трещины в основном металл, швах и околошовной зоне – 15%
6. Крен ствола трубы в целом – 45%;
- 7 Ослабление натяжения оттяжек – 70%;
8. Разрушение антикоррозионного покрытия – 90%.

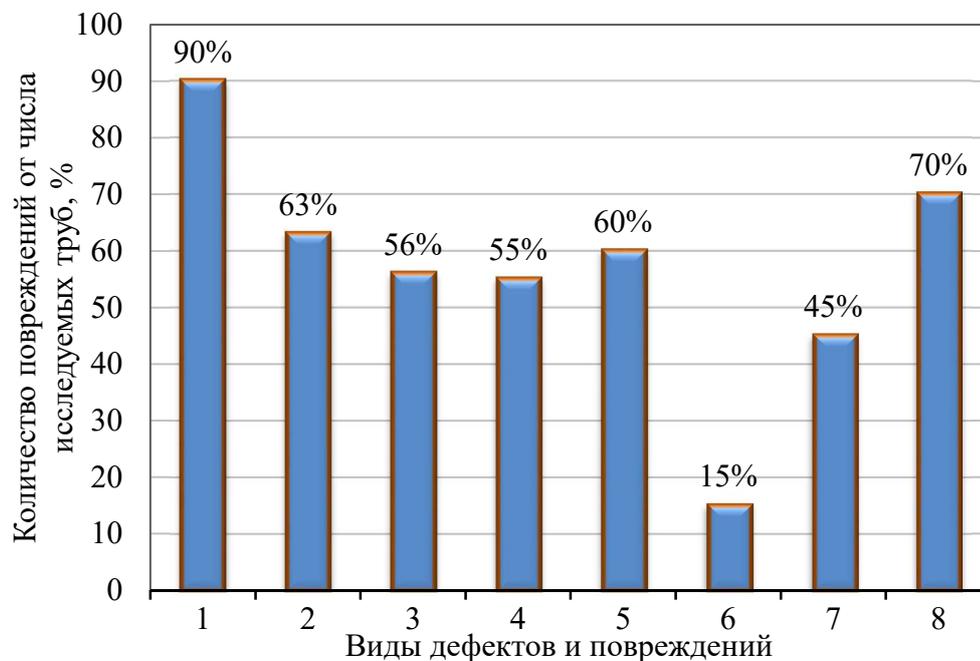


Рисунок 3.3 – Повреждения исследуемых дымовых труб:

1 – разрушение антикоррозионного покрытия; 2 – разрушение элементов фундамента; 3 – эксцентриситет стыковки царг; 4 – коррозионный износ стенки ствола; 5 – локальный (неравномерный) коррозионный износ в узлах; 6 – трещины в основном металл, швах и околошовной зоне; 7 – крен ствола трубы в целом; 8 – ослабление натяжения оттяжек.

Общие виды повреждений, характерных для металлических дымовых труб на оттяжках приведены в приложении В, таблица В1. На рис. 3.4 и 3.5 приведены характерные повреждения дымовых труб на оттяжках.

Причинами ослабления натяжения оттяжек могут быть:

- неупругие деформации канатов от действия ветровой нагрузки;
- ослабление заделки канатов в анкерах и лацменном узле;
- коррозионный износ в лацменном узле, а именно в проушинах, коушах и других элементах крепления оттяжек;
- деформации якорных фундаментов;
- крен сооружения в целом.

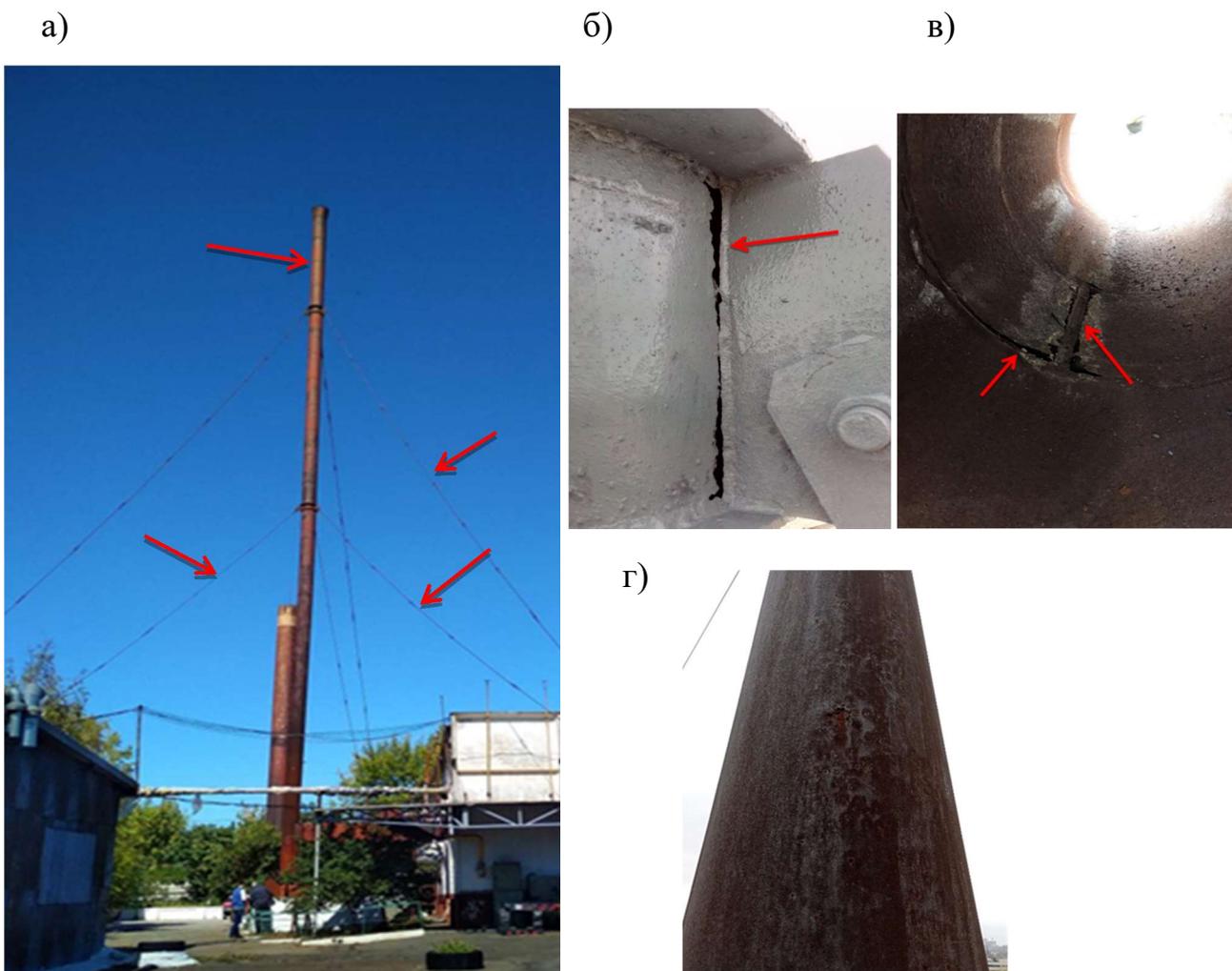


Рисунок 3.4 – Характерные повреждения стальной дымовой трубы на оттяжках высотой $H=32$ м: а) ненормативный крен ствола, ослабление натяжения оттяжек; б) в) сквозные коррозионные повреждения в лацменных узлах; г) коррозионный износ ствола трубы до 50 % поперечного сечения.

Коррозионный износ и крен сооружения учитываются напрямую в проверочных расчётах, изменением сечения или учётом дополнительных моментов.

Систематизация и анализ значений кренов исследуемых сооружений (рис. 11) показал, что 47% дымовых труб эксплуатируются с креном, превышающим предельное нормативное значение.

Коррозионный износ и крен сооружения учитываются напрямую в проверочных расчётах, изменением сечения или учётом дополнительных моментов.

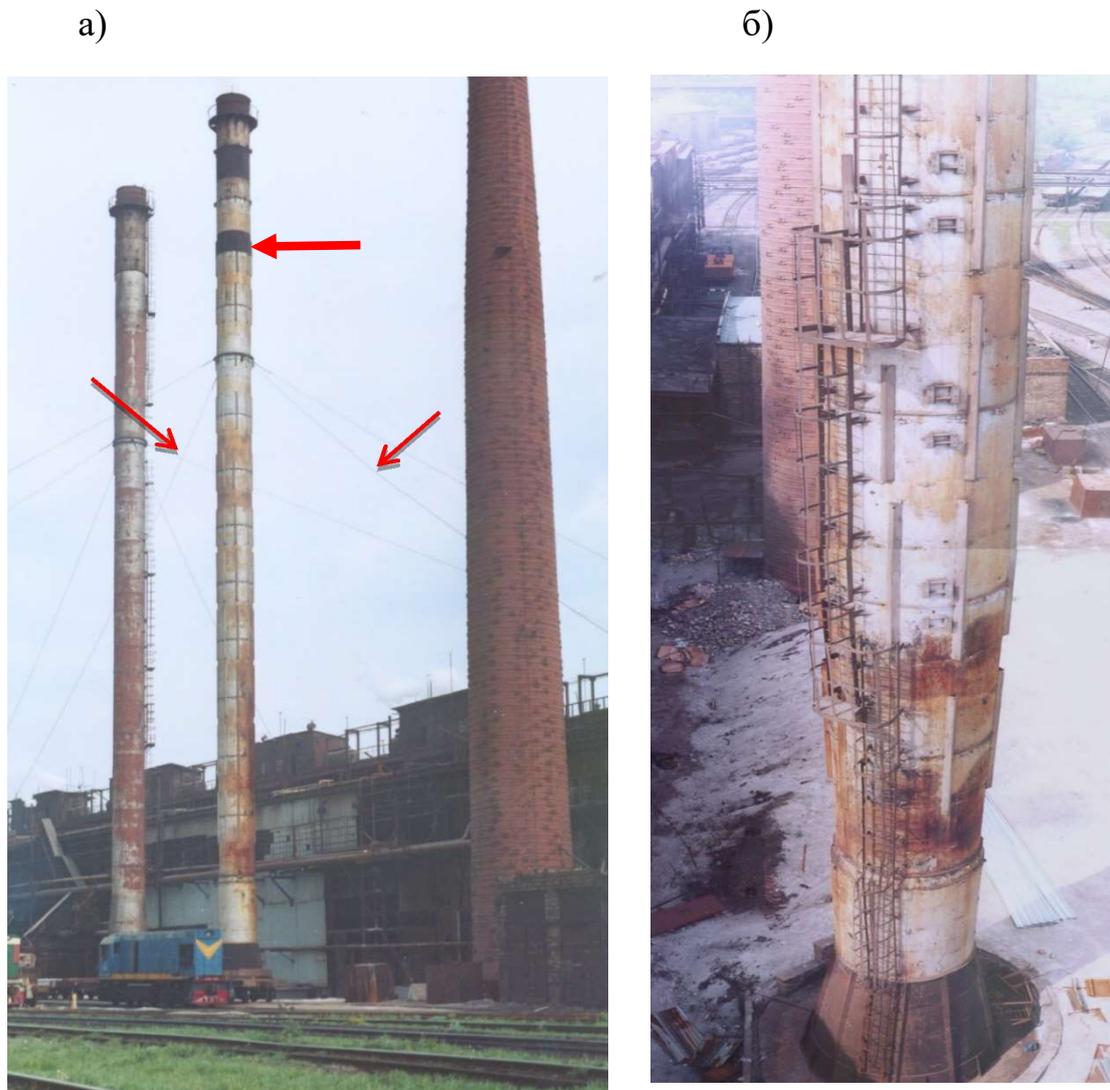


Рисунок 3.5 – Повреждения стальной дымовой трубы на оттяжках высотой $H = 75$ м: а) ослабление натяжения оттяжек; б) коррозионный износ ствола трубы до 30 % поперечного сечения.

Систематизация и анализ значений кренов исследуемых сооружений (табл. 3.3, рис. 3.6) показал, что 47% дымовых труб эксплуатируются с креном, превышающим предельное нормативное значение.

Таблица 3.3 – Значения крена ствола дымовых труб

Номер объекта	Высота H , м	Количество уровней оттяжек	Крен ствола, мм		Отношение $Q_{\text{норм}}/Q_{\text{факт}}$
			нормативный $Q_{\text{норм}}$	фактический $Q_{\text{факт}}$	
1	2	3	4	5	6
1	31,8	2	245	540	0,5
2	20	1	210	120	1,7
3	34,65	2	254	420	0,6

4	75	2	375	200	1,9
5	75	1	375	226	1,7
6	40	1	353	402	0,9
7	27,75	1	289	100	2,9
8	21,5	-	258	120	2,2
9	39,1	2	345	120	2,9
10	39,1	2	345	45	7,6
11	25,7	1	125	315	0,4
12	45	1	225	285	0,8
13	35	1	175	750	0,2
14	35	1	175	195	0,9
15	21	1	105	59	1,8
16	41,4	2	207	230	0,9
17	40	2	200	250	0,8
18	27,8	1	139	115	1,2
19	32	1	160	78	2,1
20	40	1	200	250	0,8
21	35	1	175	150	1,2
22	35	1	175	190	0,9
23	35	1	175	130	1,3
24	35	1	175	220	0,8
25	60,6	1	303	210	1,4
26	61	1	305	325	0,9
27	32,8	1	164	125	1,3
28	42,7	-	214	217	0,98
29	25,2	-	126	120	1,1
30	59,6	-	298	598	0,5
31	30	-	150	90	1,7
32	80	2	400	310	1,3

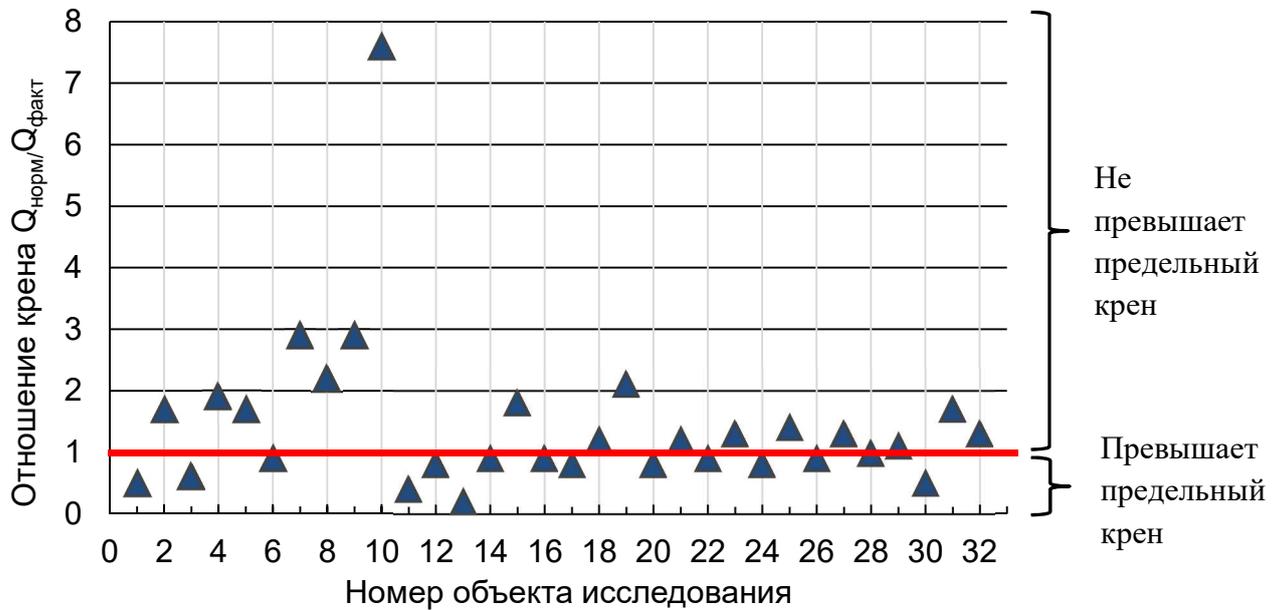


Рисунок 3.6 – Отношение крена $Q_{\text{норм}}/Q_{\text{факт}}$ стальных дымовых труб

Одним из основных показателей несущей способности стальных дымовых труб, является их остаточная толщина. На основании проведенных натурных исследований были определены остаточные толщины оболочек эксплуатируемых дымовых труб, величины которых приведены в табл. 3.4.

Результаты натурального обследования толщин оболочек были обработаны статистические методами.

Средние потери конструкций от коррозии определяются по формуле:

$$\Delta_{\text{ск}} = \frac{\sum_{i=1}^l \Delta_{\text{сэ}}}{l}, \quad (3.1)$$

где $\Delta_{\text{сэ}}$ - средние потери для отдельного элемента конструкций;

l - количество обследованных элементов.

Средние потери для отдельных элементов конструкций вычисляются с учетом среднеквадратичных отклонений:

$$\Delta_{\text{се}} = (a_{\text{ср}} + 3\sigma_a) - (b_{\text{ср}} + 3\sigma_b), \quad (3.2)$$

где: $a_{\text{ср}}$ и $b_{\text{ср}}$ - соответственно наибольшие и наименьшие среднеарифметические величины измеренных толщин элементов;

$$\sigma_a = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (a_i + a_{\text{ср}})^2}{m}}; \sigma_b = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (b_i + b_{\text{ср}})^2}{n}} \quad (3.3)$$

$\sigma_a; \sigma_s$ - среднеквадратичные отклонения;

m – количество замеров наибольших толщин,

n – количество замеров наименьших толщин.

Коррозионный износ металла оболочек может быть как с наружной, так и с внутренней стороны. Увеличение износа происходит с увеличением высоты трубы.

Причиной коррозионного износа внутренней поверхности ствола является его работа в среде агрессивных составляющих отводимых газов при разрушении антикоррозионного покрытия внутренней поверхности ствола.

При соприкосновении отводимых газов с внутренней поверхностью, имеющей значительно низкую температуру из-за отсутствия теплоизоляции, происходит их остывание и следственно образование конденсата с внутренней стороны ствола. Образовавшийся конденсат в результате химического взаимодействия с сернистыми составляющими отводимых газов образует раствор серной кислоты, которая растворяет оксидные пленки и активирует анодные процессы на поверхности металла, приводящие к его коррозионному разрушению.

Анализ полученных данных показал, что в целом для исследуемых объектов характерен локальный износ на уровне оголовка, в уровне оттяжек, средней части и опорной части. Место и степень коррозионного износа зависит от условий эксплуатации и от целостности футеровки.

Примерно 40% дымовых труб имеют равномерный износ по высоте, 35% - больший износ опорной части, 25% - оголовка.

Скорость износа оболочек металлических дымовых труб варьируется в пределах:

- для опорной части от 0,01 до 0,15 мм/год;
- для средней части от 0,01 до 0,13 мм/год;
- для верхней части от 0,004 до 0,155 мм/год.

Скорость износа представлена в таблице 3.4. Графические данные скорости износа приведены на рисунке 3.7.

Таблица 3.4 – Толщина стенки дымовых труб и скорость износа

Номер объек- та	Высота Н, м	Период эксплуата- ции на момент обслед., год	Толщина, мм		Степень износа Δk , %	Скорость износа, мм/год
			проект- ная	средняя фактичес- кая		
1	2	3	4	5	6	7
1	31,8	20	6	3,1	38/33/48	0,1...0,145
2	20	43	8/6	5,4/3,8	32/37	0,05...0,07
3	34,65	12	9	8,3	7	0,06
4	75	55	12/10/8	9,1/7,3/5	24/27/37	0,05...0,06
5	75	71	12/10/8	11,2/9,1/6,7	6,7/9/35	0,01...0,04
6	40	24	10	9,5	5	0,021
7	27,75	53	10/6	9,7/5,7	3/5	0,005
8	21,5	17	10	4	60	0,35
9	39,1	51	7/5	5,5/3,5	21/30	0,03..0,07
10	39,1	51	7/5	5,8/3,9	17/22	0,02
11	25,7	17	12	9,4	21,7	0,15
12	45	37	10/8/6	6/7,8/5,6	40/2,5/6,7	0,01...0,11
13	35	39	10/8	5,8/5,3	42/33,8	0,07...0,11
14	35	32	10,8	7,6/6,9	24/13,8	0,03...0,08
15	21	46	10	8	20	0,04
16	41,4	29	10	7,6	24	0,08
17	40	43	14/12/10/8	13,1/9,7/8,4/ 5,9	6,4/19/16/26,3	0,02...0,05
18	27,8	40	6	5,2	13,3	0,02
19	32	40	12/5	9,9/4,5	17,5/10	0,01...0,05
20	40	40	10/8	8,7/6,8	13/15	0,03
21	35	40	8/6	6,9/5,2	13,8/13,3	0,02...0,03
22	35	38	10/8/6	7,9/6/5,5	21/25/8,3	0,01...0,06
23	35	39	8/6	6,2/5,6	22,5/6,7	0,01...0,05
24	35	39	8/6	7,8/5,1	2,5/15	0,01...0,02
25	60,6	39	16/12	10,3/8,1	35,6/32,5	0,1...0,15
26	61	38	16/14/12 /10	12,2/10,6/8,5 /7,3	23,8/24,3/29/ 27	0,07...0,1
27	32,8	73	12/8/6	9,1/6,9/4,5	24,2/13,8 /25	0,02...0,04
28	42,7	73	12/10/8	10,7/9/7,7	10,8/10/3,8	0,004..0,02
29	25,2	43	12/10	9,8/7,8	18,3/22	0,05
30	59,6	34	16/12/10/8	13,3/9,3/9,2/ 6	16,9/22,5/8/25	0,09...0,12

31	30	77	12/10	9,6/7,6	20/24	0,04
32	80	77	18/16/12	15,7/11,6/7,9	12,7/27,5/ 34,2	0,03...0,06

Верхняя часть ствола
0,004...0,155 мм/год

Средняя часть ствола
0,01...0,13 мм/год

Опорная часть ствола
0,01...0,15 мм/год

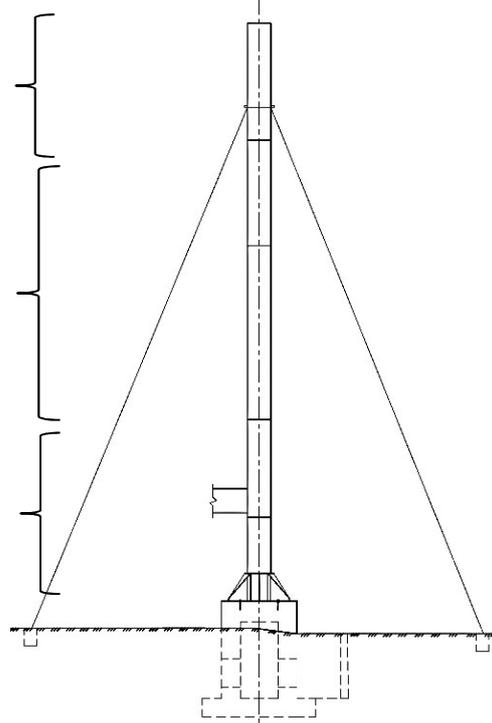


Рисунок 3.7 – Распределение скорости коррозионного износа по участкам ствола трубы, мм/год

Распределение степени коррозионного износа нижней части ствола дымовых труб от периода эксплуатации представлена на рис. 3.8.

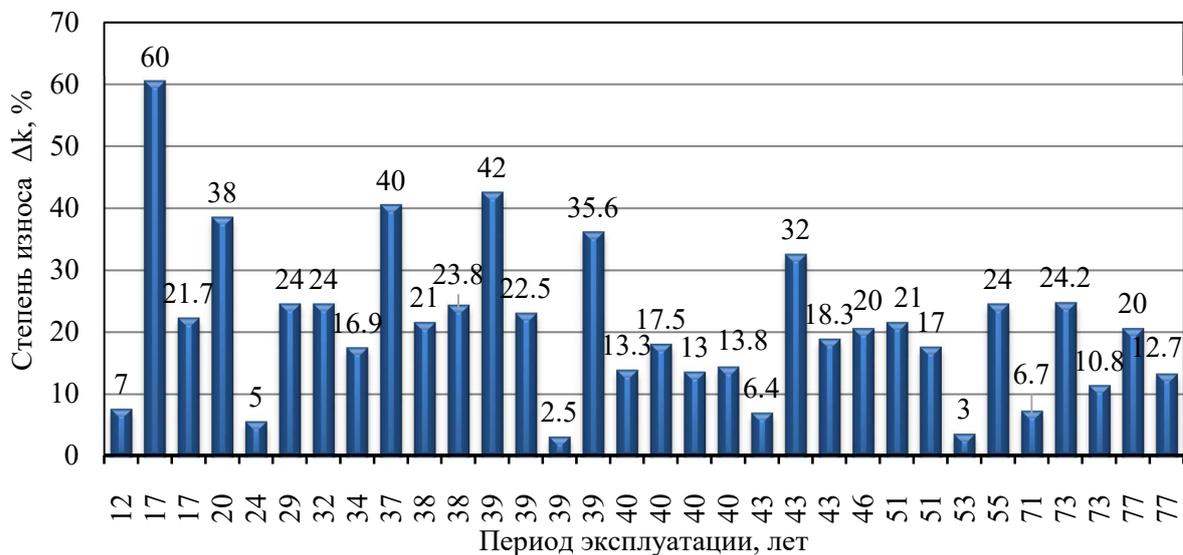


Рисунок 3.8 – Полученные данные степени коррозионного износа ствола при различных сроках службы

Наибольший уровень коррозионного износа наблюдается в лацменных узлах, что приводит к изменению параметров соединения и повышению напряжений. Данный вид износа вызывает местные повреждения кольцевых

ребер и ребер-проушин, а также приводит к исключению оттяжек из расчетной схемы, что негативно влияет на НДС дымовой трубы с оттяжками.

Скорость коррозионного износа стальных дымовых труб на оттяжках напрямую зависит от нескольких факторов, включая принятые конструктивные решения, условия агрессивности внешней и внутренней среды промышленного предприятия или котельной в городской черте, а также гибкость самого сооружения.

Конструктивные решения, применяемые при проектировании дымовых труб с оттяжками, оказывают существенное влияние на скорость коррозионного износа. Выбор материалов, методы защиты от коррозии, а также особенности геометрии и соединений конструкции могут способствовать либо замедлению, либо ускорению процесса коррозии.

Условия агрессивности внешней и внутренней среды также играют значительную роль. Наличие вредных химических веществ, высоких температур, влажности, а также особенности работы промышленного предприятия или котельной в городской черте могут приводить к ускоренной коррозии дымовых труб.

Гибкость сооружения оказывает влияние на скорость коррозионного износа. Деформации, колебания и вибрации, вызванные изменениями температуры, ветровыми нагрузками или другими факторами, могут способствовать образованию трещин, ослаблению защитного покрытия и ускоренной коррозии.

Учет всех этих факторов при проектировании и эксплуатации дымовых труб на оттяжках позволит более эффективно контролировать коррозионный износ и продлить срок их службы.

3.3 Выводы по разделу III

1. Согласно обобщенного опыта проведения натурных исследований высотных сооружений, разработана методика проведения натурных исследований стальных дымовых труб с оттяжками. Данная методика основана на структурировании несущих и дополнительных конструкций, которые необходимо учитывать при обследовании, зонировании конструкций

по степени износа и планировании технического обслуживания.

2. В результате проведения натуральных исследований стальных дымовых труб с оттяжками, выявлены наиболее распространённые виды повреждений, определены их количественные характеристики и геометрические параметры.

3. Повреждения стальных труб на оттяжках могут быть классифицированы как общие, влияющие на распределение усилий в конструкции в целом, и локальные, которые оказывают влияние на напряженно-деформированное состояние узловых соединений. Общие повреждения стальных труб на оттяжках включают такие факторы, как коррозионный износ и деформации. Коррозионный износ приводит к уменьшению толщины стенки трубы, что в свою очередь снижает ее несущую способность. Деформации, такие как пластические деформации или искривления, изменяют геометрические характеристики труб и влияют на ее несущую способность.

Установлено, что среди исследованных дымовых труб наиболее значимыми повреждениями, влияющими на напряженно-деформированное состояние сооружения, являются следующие: общий коррозионный износ, затрагивающий до 50% поперечного сечения трубы, локальный износ лацменного узла до 90%, крен трубы до 1/60 высоты ствола, обрыв оттяжек и ослабление предварительного натяжения.

4. Увеличение износа происходит с увеличением высоты трубы, и как следствие приводит к повышению уровня действующих усилий и напряжений.

Определено, что наибольший уровень коррозионного износа наблюдается в лацменных узлах, что приводит к изменению параметров соединения и повышению напряжений. Данный вид износа вызывает местные повреждения кольцевых ребер и ребер-проушин, а также приводит к исключению оттяжек из расчетной схемы, что негативно влияет на НДС дымовой трубы с оттяжками.

5. Для дальнейшей разработки рекомендаций по рациональному выбору конструктивных параметров элементов усиления необходимо провести численные исследования НДС лацменных узлов дымовых труб

РАЗДЕЛ IV. НЕСУЩАЯ СПОСОБНОСТЬ ОБОЛОЧКИ ДЫМОВЫХ ТРУБ В УСЛОВИЯХ ИЗНОСА

Дымовые трубы являются важными элементами инфраструктуры, применяемыми в различных промышленных и коммерческих объектах для эффективного отвода отработанных газов и дыма. Как и любая конструкция, дымовые трубы подвержены износу со временем, особенно износу оболочки, которая является несущим элементом трубы. Несущая способность оболочки дымовых труб играет ключевую роль в обеспечении их стабильной работы и безопасности.

Понимание влияния износа на несущую способность оболочки дымовых труб позволит разработать эффективные стратегии для контроля износа и обеспечения безопасности и надежности работы этих конструкций. Результаты исследования могут быть использованы для оптимизации процессов обслуживания и ремонта дымовых труб, а также для разработки рекомендаций по проектированию новых конструкций с учетом устойчивости к износу.

В дальнейшем представлены результаты численных исследований, анализирующих влияние различных видов износа на несущую способность оболочки дымовых труб. Это позволит лучше понять механизмы разрушения и разработать рекомендации для поддержания несущей способности и безопасности дымовых труб в условиях износа.

Численные исследования проводились для типовых дымовых труб на оттяжках высотой до 100 м. Рассматривались дымовые трубы с соотношением диаметра к высоте d/H от 1/64 до 1/33. В качестве объекта исследования приняты наиболее распространенные типовые лацменные узлы. Общие параметры варьирования численных исследований лацменных узлов типовых дымовых труб на оттяжках при износе приведены в таблице 4.1

Таблица 4.1 – Варьируемые параметры численных исследований
лацменных узлов при износе

№ п/п	Исследуемые параметры	Диапазон исследования
1	2	3
Напряжение в кольцевых ребрах дымовых труб		
1	Толщина кольцевых ребер, t_p	от 16 до 6 мм (шаг 2 мм)
2	Толщина ребер крепления оттяжек, t_1	от 18 до 8 мм (шаг 2 мм)
3	Диаметр оси крепления оттяжек, $d_{кр}$	от 24 до 36 мм (шаг 2 мм)
4	Предварительное напряжение оттяжек, σ_{01}, σ_{02}	для 1-го уровня от 10 до 60 МПа; для 2-го – от 17 до 100 МПа
Напряжение в лацменных узлах на участке влияния краевого эффекта для дымовых труб		
5	Толщина оболочки ствола $t_{ст}$	от 3 до 6 мм
6	Предварительное напряжение оттяжек, σ_{01}, σ_{02}	для 1-го уровня от 6 до 15 МПа; для 2-го – от 8 до 20 кН

4.1 Напряженно-деформированное состояние лацменных узлов дымовых труб

Основной целью этого подраздела является исследование напряженно-деформированного состояния лацменных узлов дымовых труб при изменении толщины кольцевых ребер, ребер жесткости и диаметра оси крепления оттяжек. Важность исследования узлов определяется также тем, что в процессе эксплуатации происходит коррозионный износ, который приводит к изменению параметров соединения.

Для исследования НДС кольцевых ребер разработана модель лацменного узла дымовой трубы, которая включает в себя ствол, верхнее и нижнее кольцевые ребра, ребра и ось крепления оттяжек (рис. 4.1). Угол между оттяжками в плане составляет 90° . В пространстве труба раскреплена оттяжками в 2-х уровнях. Расположение оттяжек принято в соответствии с [109]. Исследование проводилось для 2-го уровня лацменного узла крепления оттяжек (рис.4.1).

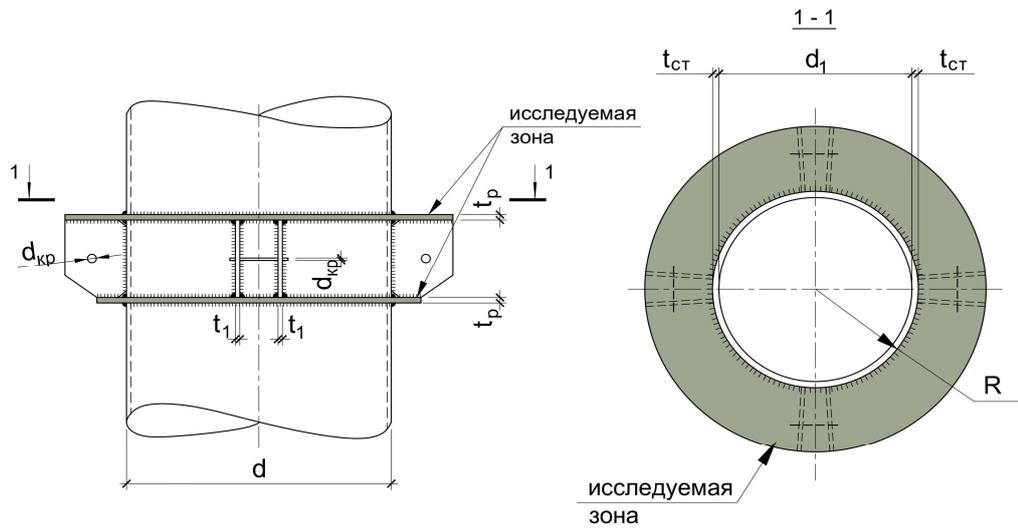


Рисунок 4.1 – Модель численных исследований лацменного узла

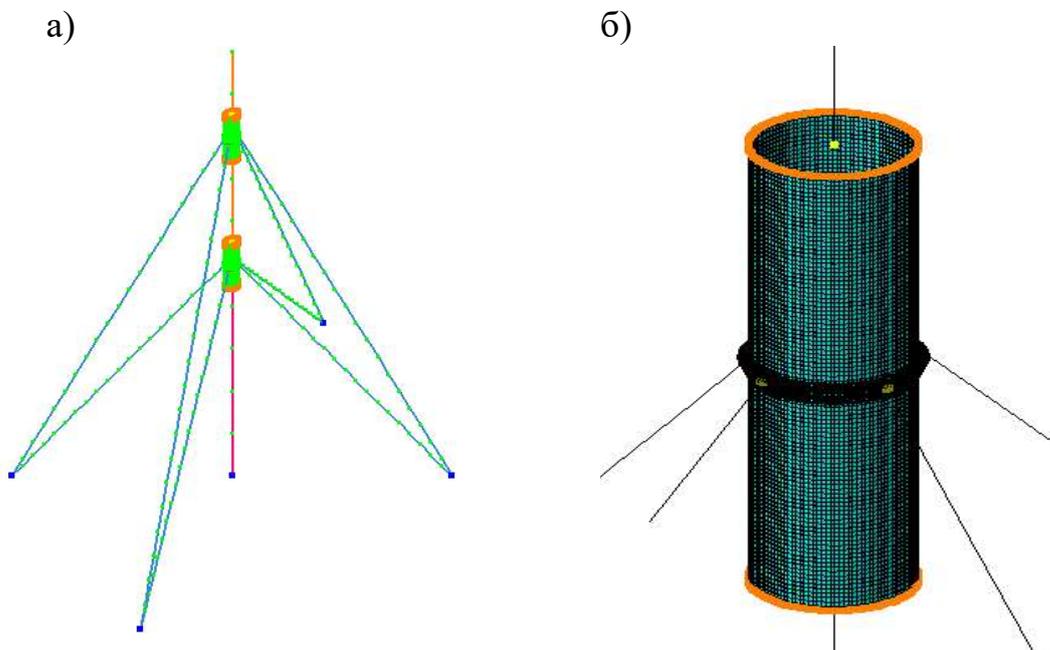


Рисунок 4.2 – Модель дымовой трубы стержнями с цилиндрическими участками

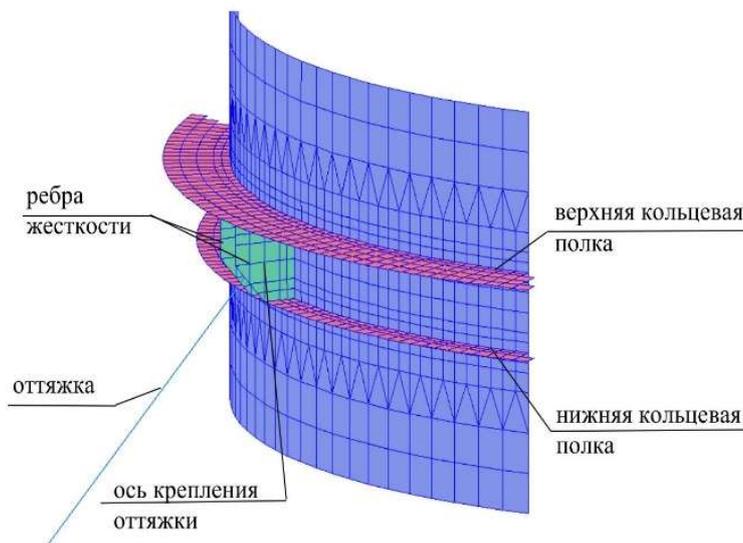


Рисунок 4.3 – Модель лацменного узла

Моделирование лацменного узла дымовой трубы выполняется с помощью программного комплекса LIRA-SAPR 2021.

Ствол дымовой трубы разбивается на 10 расчетных участков по 10 м. Оттяжки разбиваются на длине на 20 равных участка (рис. 4.2а). Лацменный узел моделируется в виде цилиндрической оболочки (рис. 4.2б), кольцевые полки и ребра выполнены из пластин (рис. 4.3) с размера ячеек 25x25 и 50x50 мм, поскольку дальнейшее уменьшение размера ячейки повышает точность расчета не более, чем на 5 %. Результаты расчета лацменного узла с максимальными напряжениями представлены на рис. 4.4-4.6.

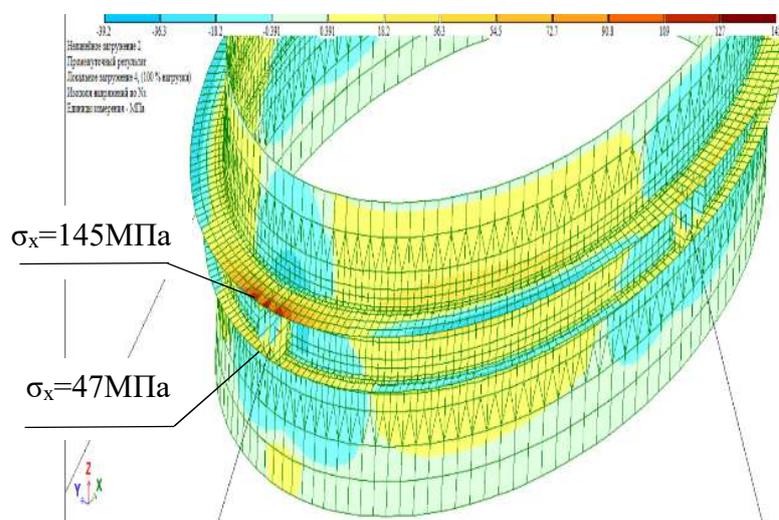


Рисунок 4.4. – Результаты расчета кольцевых напряжений лацменного узла

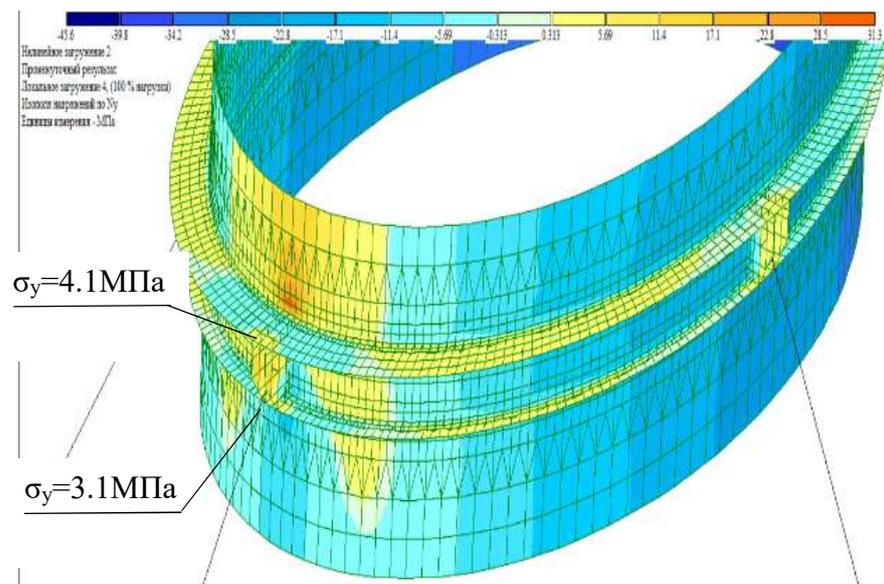


Рисунок 4.5 – Результаты расчета меридиональных напряжений лацменного узла

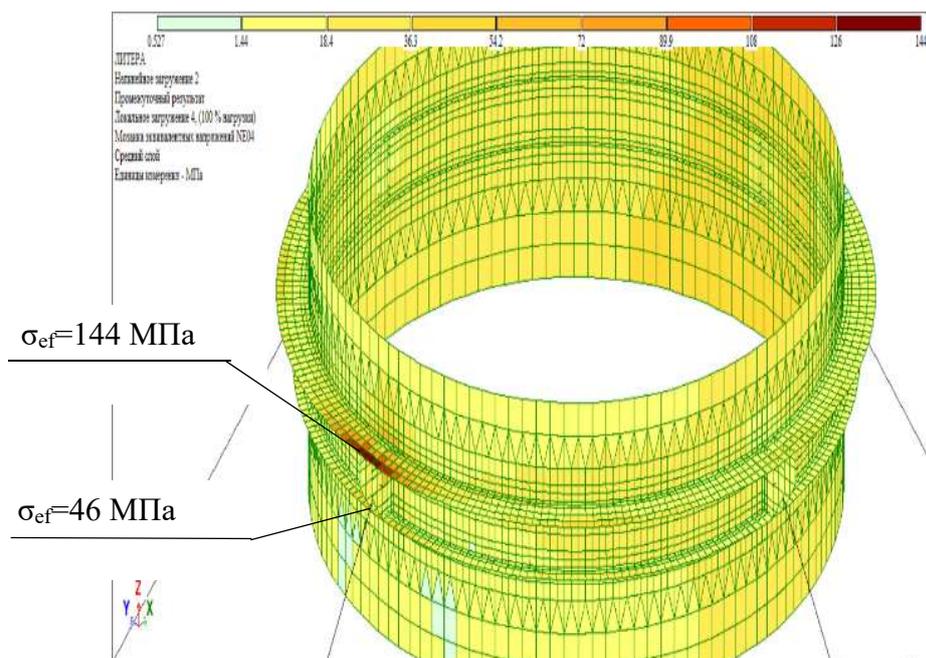


Рисунок 4.6 – Результаты расчета приведенных напряжений лацменного узла

В качестве основных конструктивных параметров, влияющих на напряженно-деформированное состояние лацменного узла в работе, рассматриваются: толщина кольцевых ребер, размеры ребер жесткости и диаметр оси крепления оттяжек.

4.1.1 Влияние изменения толщины кольцевых ребер

Рассмотрим зависимость напряжений лацменного узла крепления оттяжек к дымовой трубе при изменении толщины кольцевых ребер.

Зависимость изменения кольцевых, меридиональных и приведенных напряжений при изменении толщины кольцевых ребер от 16 до 6 мм представлены на рис.4.7 - 4.9. На графиках наблюдается значительное увеличение меридиональных напряжений кольцевых ребер верхнего ребра в 6 раз, нижнего в 2,9 раза, кольцевых напряжений в 2 раза. Приведенные напряжения увеличиваются в кольцевых ребрах в 2,1 - 2,2 раза.

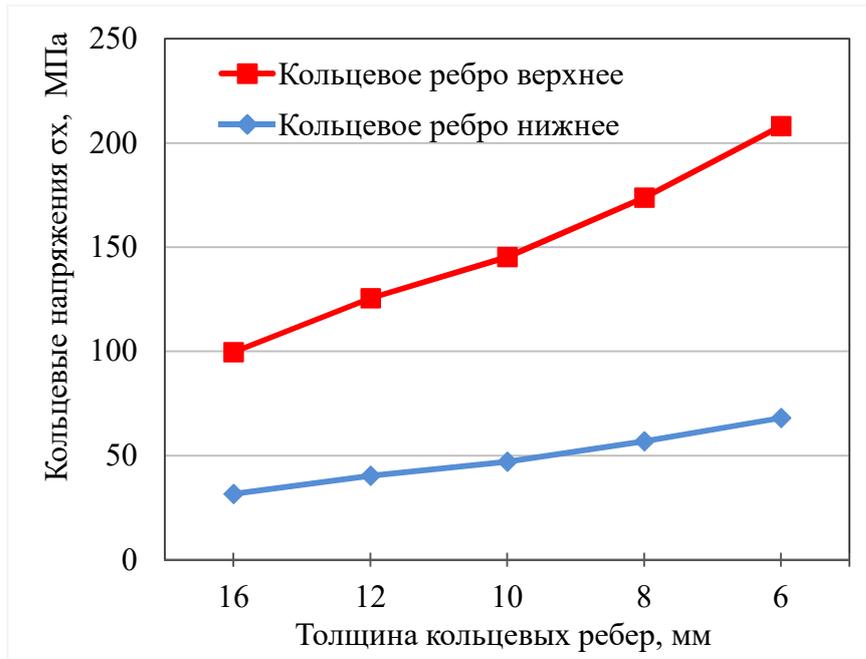


Рисунок 4.7 – Зависимость изменения кольцевых напряжений при уменьшении толщины кольцевого ребра

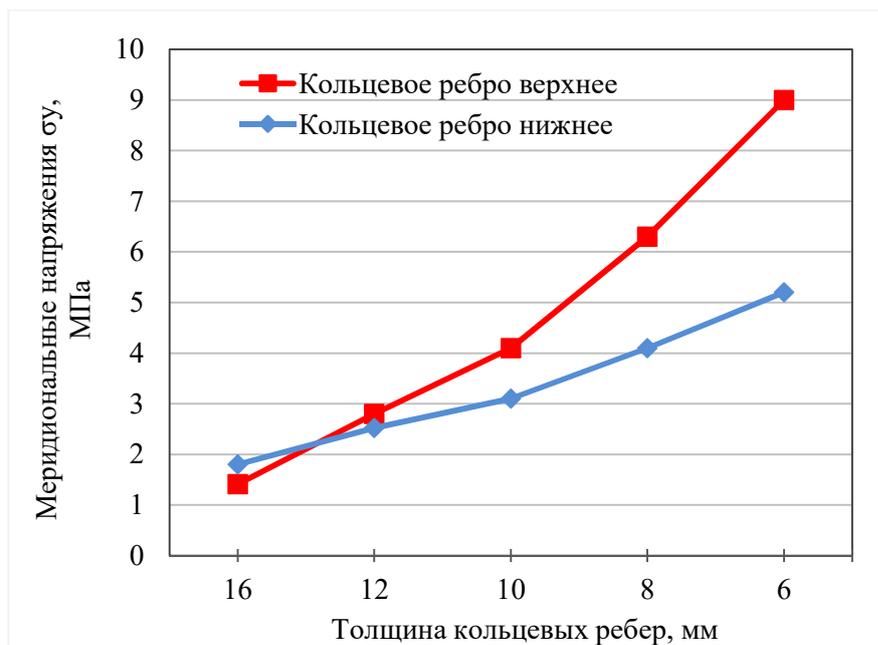


Рисунок 4.8 – Зависимость изменения меридиональных напряжений при уменьшении толщины кольцевого ребра

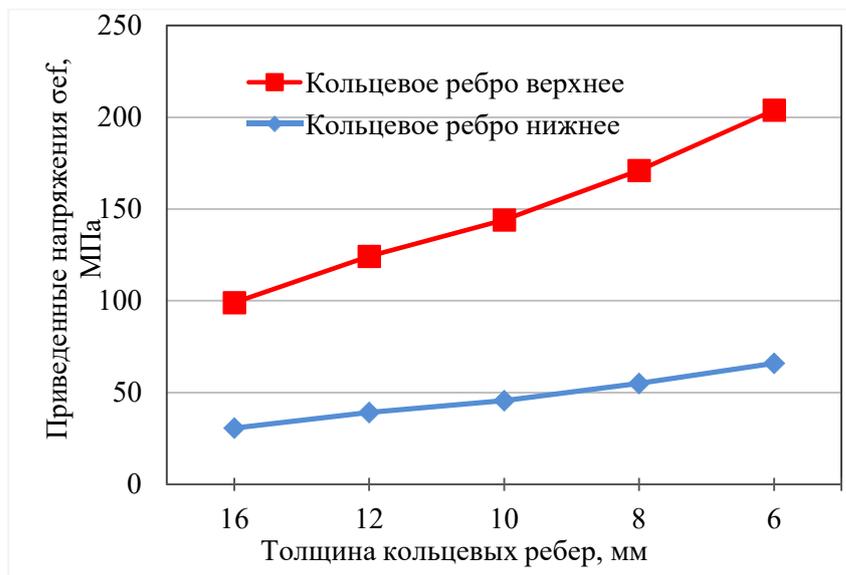


Рисунок 4.9 – Зависимость изменения приведенных напряжений при уменьшении толщины кольцевого ребра.

4.1.2 Зависимость изменения толщины ребер крепления оттяжек

Зависимость изменения кольцевых, меридиональных и эквивалентных напряжений лацменного узла при изменении толщины ребра жесткости представлены на рис. 4.10 - 4.12. Уменьшение толщины ребра жесткости от 18 до 8 мм приводит к уменьшению меридиональных напряжений верхнего кольцевого ребра на 58%, а меридиональные нижнего ребра на 22%, кольцевые и приведенные напряжения остаются почти неизменными, около 4-7%.

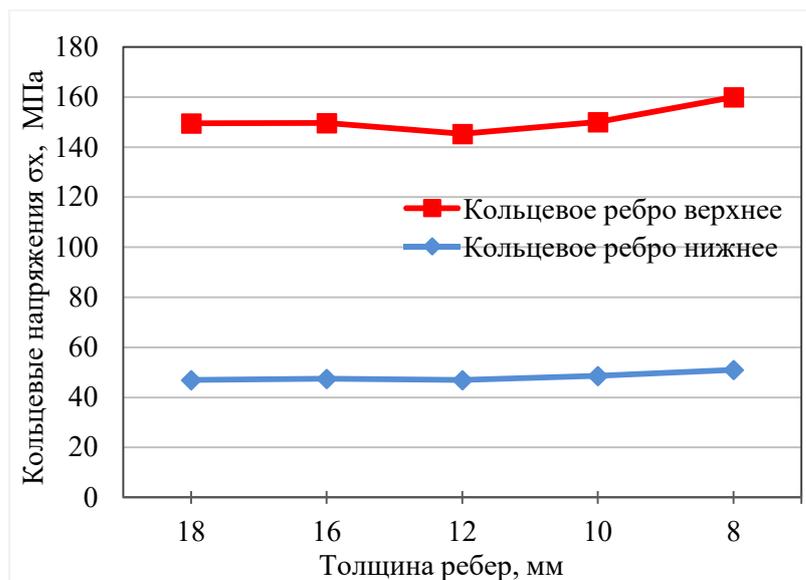


Рисунок 4.10 – Зависимость изменения кольцевых напряжений при уменьшении толщины ребер крепления оттяжек

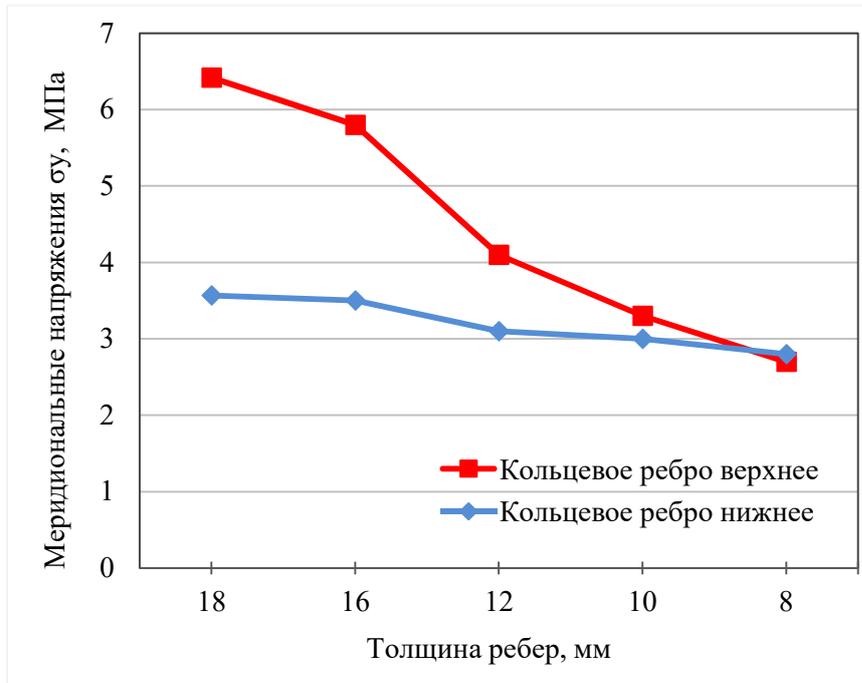


Рисунок 4.11 – Зависимость изменения меридиональных напряжений при уменьшении

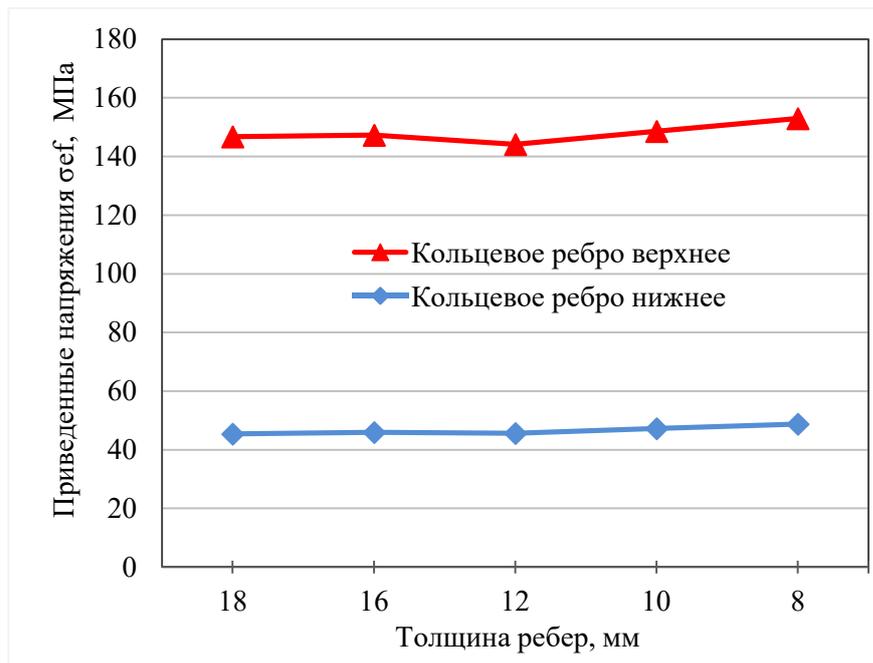


Рисунок 4.12 – Зависимость изменения приведенных напряжений при уменьшении толщины ребер крепления оттяжек

4.1.3 Влияние изменения диаметра оси крепления оттяжки

Рассмотрим зависимость напряжений лацменного узла крепления оттяжек к дымовой трубе при изменении диаметра оси.

На НДС лацменного узла дымовых труб не оказывает существенного влияния диаметр оси крепление оттяжек. Это можно судить по графикам, изображенным на рис. 4.13 - 4.15. При изменении диаметра оси от 36 до 24 мм наблюдается незначительное изменение кольцевых, меридиональных и приведенных напряжений до 3% в кольцевых ребрах.

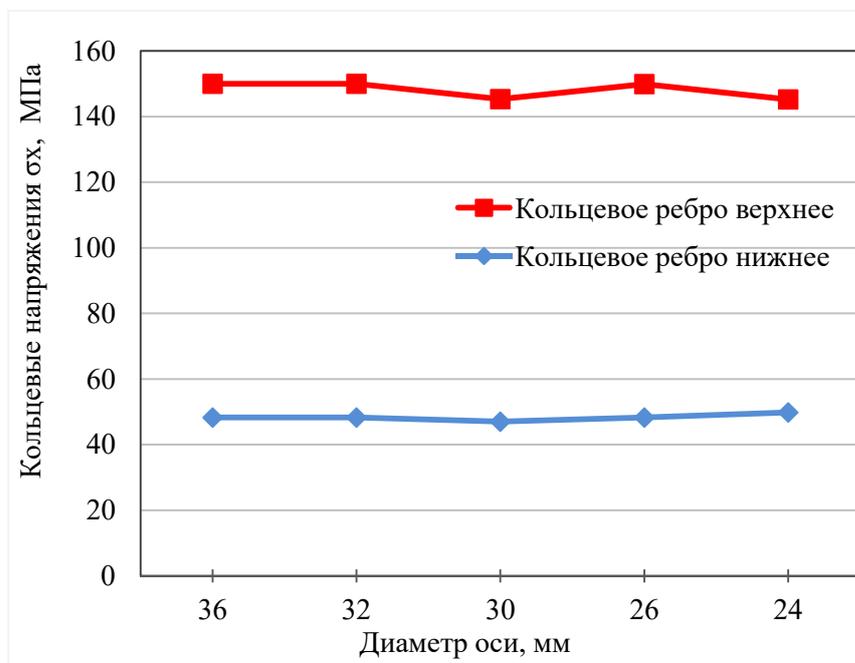


Рисунок 4.13 – Зависимость изменения кольцевых напряжений в ребрах при уменьшении диаметра оси.

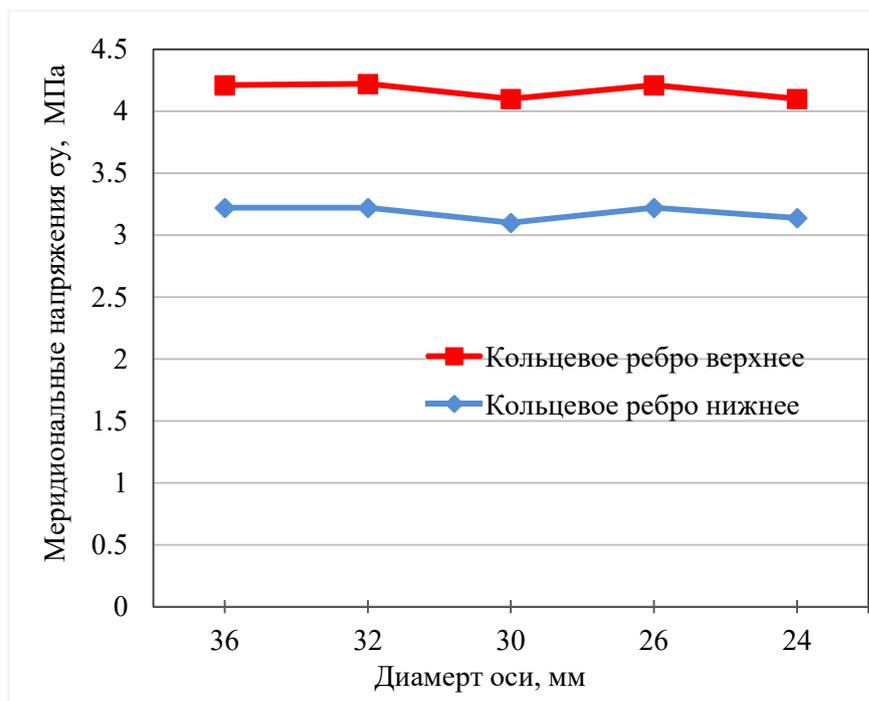


Рисунок 4.14 – Зависимость изменения меридиональных напряжений в кольцевых ребрах при уменьшении диаметра оси.

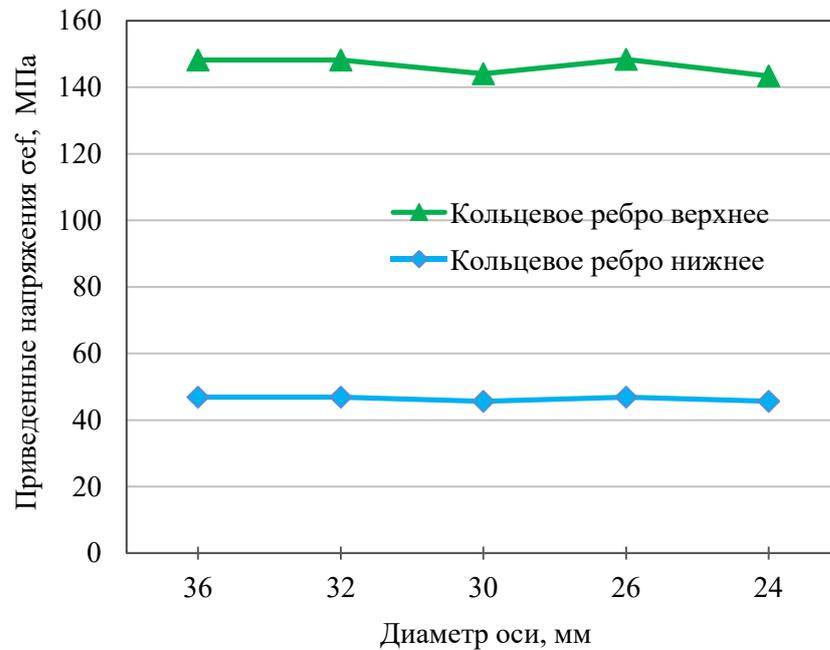


Рисунок 4.15 – Зависимость изменения приведенных напряжений в кольцевых ребрах при уменьшении диаметра оси.

По результатам выполненных исследований НДС лацменного узла дымовых труб в условиях изменения конструктивных параметров, вызванных износом, можно сделать следующие выводы:

1. Уменьшение толщины ребер лацменного узла от 16 до 6 мм оказывает значительное влияние на напряжения в кольцевых ребрах. Приведенные напряжения в кольцевых ребрах при износе увеличиваются в 2,1 - 2,2 раза. Это указывает на необходимость учитывать и контролировать изменения в толщине ребер при оценке и обеспечении несущей способности дымовых труб.

2. Уменьшение толщины ребра жесткости с 18 мм до 8 мм приводит к снижению меридиональных напряжений в кольцевых ребрах на 22-58%. Приведенные напряжения в кольцевых ребрах остаются практически неизменными и не превышают 7%. Это говорит о значимой роли ребра жесткости в поддержании структурной прочности и надежности лацменного узла дымовых труб.

3. Изменение диаметра оси крепления оттяжек с 36 до 24 мм оказывает незначительное влияние на напряжения в кольцевых ребрах, не превышающее 3%.

4.2. Исследование лацменного узла дымовой трубы с износом

Цель является сравнительный анализ влияния повреждений в процессе износа на напряженно-деформированное состояние лацменного узла дымовой трубы.

В работе исследуется стальная труба котельной, работающая на твердом топливе, высотой $h = 31,8$ м. Вид сжигаемого топлива – природный газ. Данная дымовая труба предназначена для отвода дымовых газов котельных установок.

Для исследования краевого эффекта в лацменных узлах дымовых труб разработана модель узла, состоящая из ствола, кольцевых ребер и ребер-проушин (рис. 4.19, 4.18). Ствол раскрепляется оттяжками, расположенными в два яруса. Угол между оттяжками в плане составляет 120° . Футеровка ствола трубы по всей высоте отсутствует.

Моделирование дымовой трубы выполняется с помощью программного комплекса ПК LIRA-SAPR 2021 с учетом дефектов и повреждений. Расчетная модель дымовой трубы приведена на рисунке 4.16.

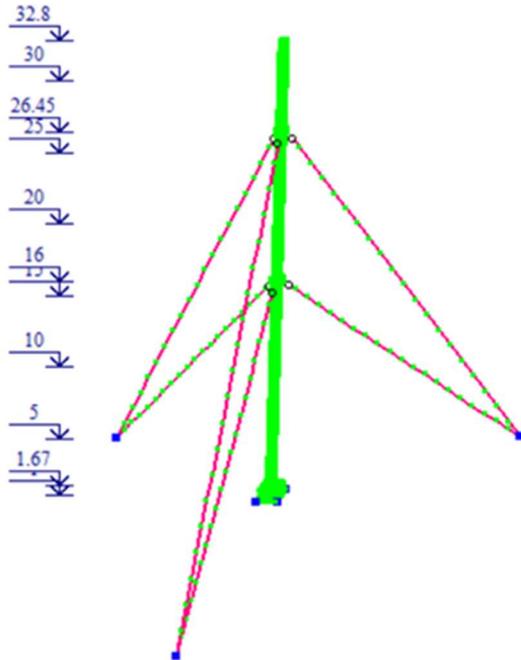


Рисунок 4.16 – Расчетная модель дымовой трубы

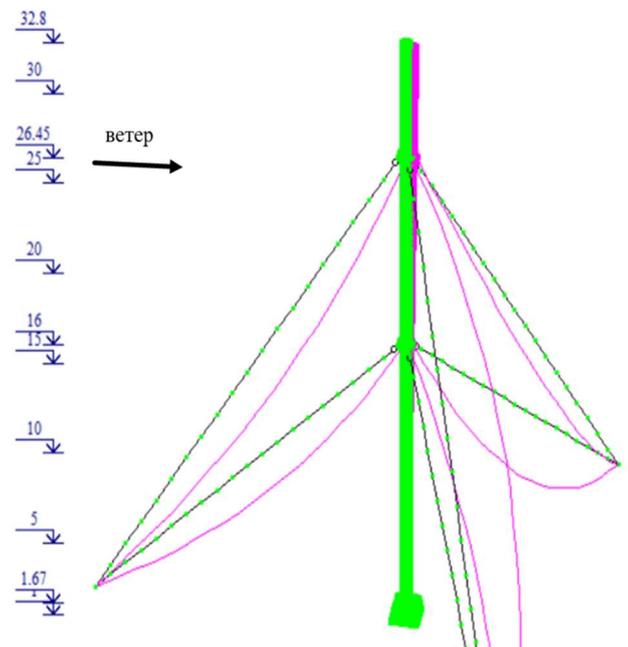


Рисунок 4.17 – Деформированная схема модели дымовой трубы

В процессе расчета определяются деформации системы в виде перемещения узлов, нормальные и касательные напряжения в элементах оболочки. В результате расчета на рисунке 4.17 представлена деформированная схема трубы при ветровой нагрузки, действующей в плоскости оттяжки.

Расчет НДС дымовой трубы выполняется по 8 расчетным сочетаниям нагрузок [27]. Максимальные напряжения в стволе возникают при расчетном сочетании - ветровая нагрузка при предельном расчетном значении температуры в теплый период года ($+40^{\circ}\text{C}$), без технологического нагрева ствола.

В работе подробно рассматривается один из важнейших узлов дымовой трубы - узел соединения оттяжек к стволу (рис. 4.18). По результатам обследования в уровне лацменного узла выявлены повреждения в виде коррозионного износа стенки до 53% и участки со сквозной коррозией, приводящие к изменению параметров соединения. Эти повреждения связаны с переоборудованием вида котельной установки с твердого топлива на природный газ. В результате уменьшения технологического нагрева ствола от проектного, верхняя часть трубы остаётся холодной, появляется «точка россы» на 2 уровне оттяжек.

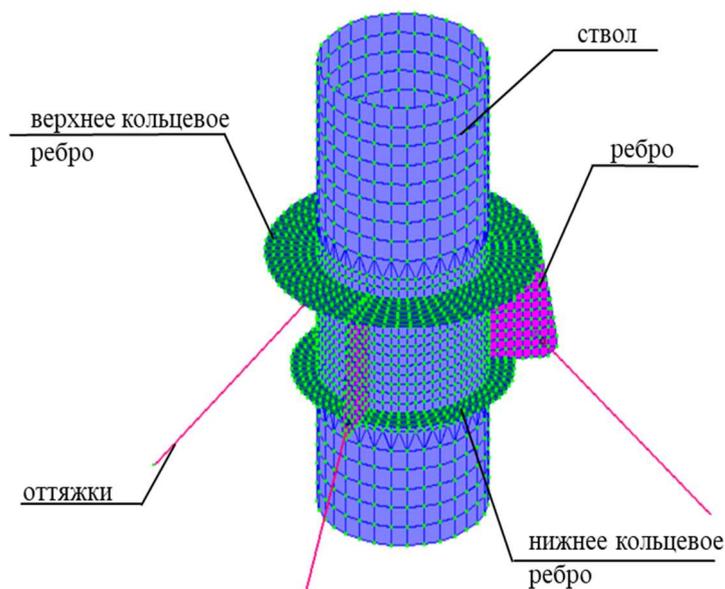


Рисунок 4.18 – Модель лацменного узла дымовой трубы

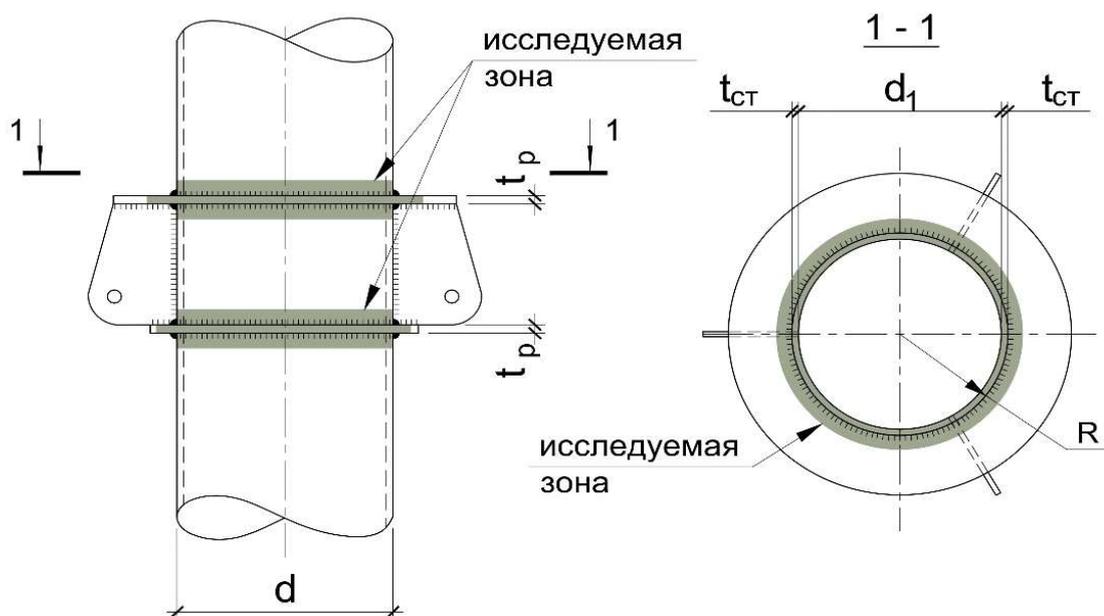


Рисунок 4.19 – Модель численных исследований лацменного узла

В ПК ЛИРА коррозионный износ ствола моделируется уменьшением жесткостных параметров оболочки, а зона сквозного разрушения оболочки представлена жесткостью близкой к нулю. Провисание оттяжек учитывается в виде минимального предварительного напряжения оттяжек. На рисунке 4.19 приведена модель лацменного узла и зона исследования (зона краевого эффекта).

На рисунках 4.20 и 4.21 представлены максимальные меридиональные, кольцевые и приведенные напряжения лацменного узла в виде идеальной оболочки и в процессе износа.

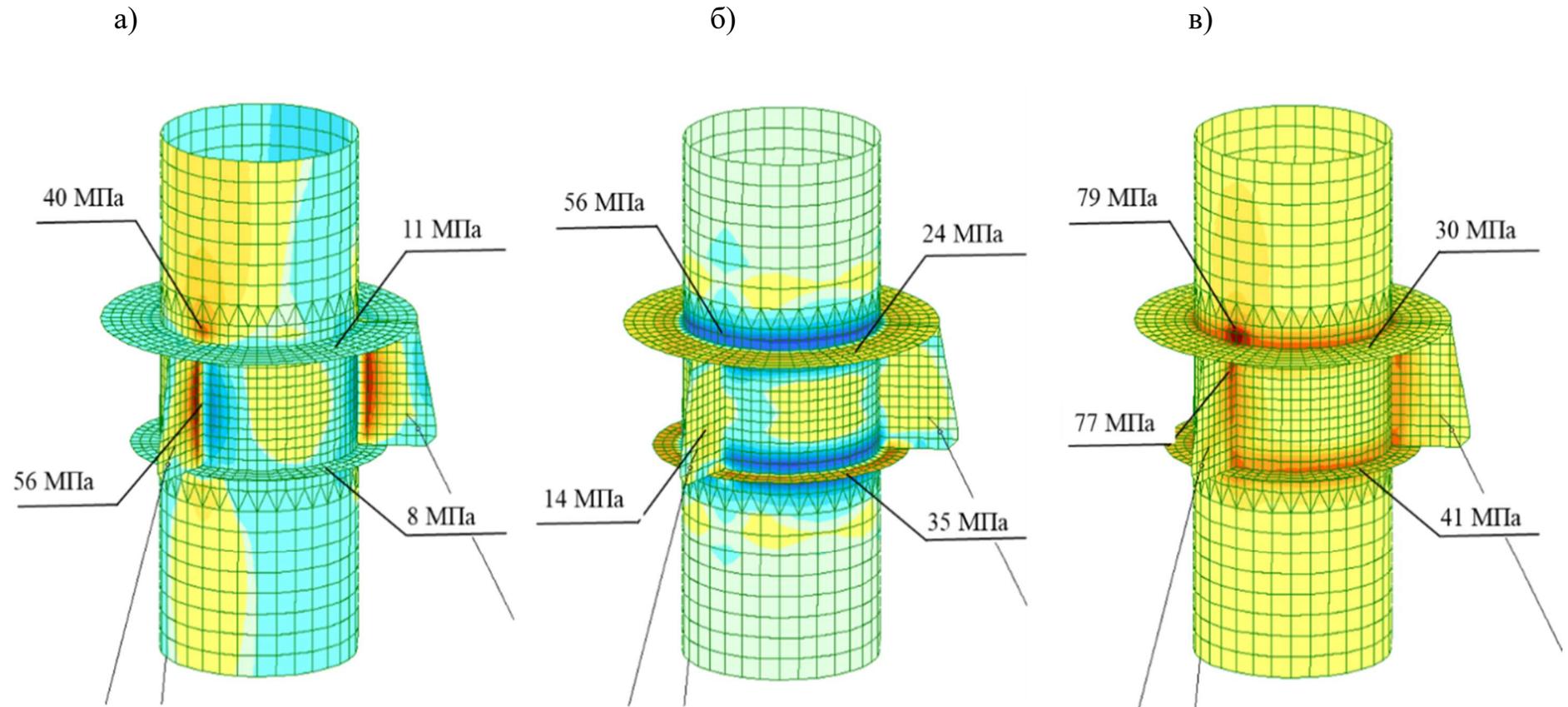


Рисунок 4.20 – Максимальные напряжения в элементах лацменного узла дымовой трубы в виде идеальной оболочки:

а) меридиональные напряжения σ_x , б) кольцевые напряжения σ_y , в) приведенные напряжения σ_{ef} .

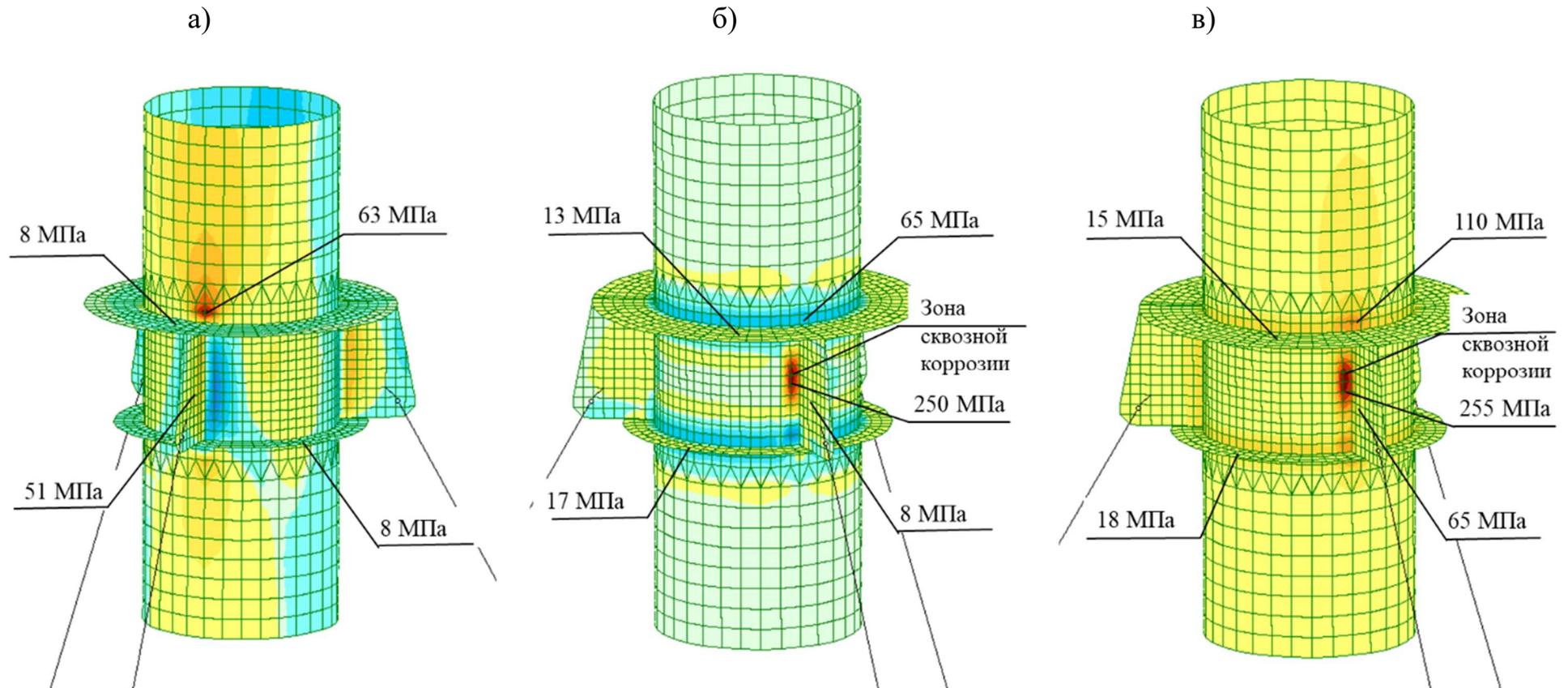


Рисунок 4.21 – Максимальные напряжения в элементах лацменного узла дымовой трубы в процессе износа:

а) меридиональные напряжения σ_x , б) кольцевые напряжения σ_y , в) приведенные напряжения σ_{ef} .

Повреждения оказывают значительное влияние на напряжения в лацменных узлах. Меридиональные напряжения в стволе трубы увеличиваются на 58%, кольцевые на 17%. Приведенные напряжения в зоне сопряжения ствола с кольцевым ребром увеличиваются на 40%, однако не превышают расчетное сопротивление для листового проката, из которого изготовлена труба. В процессе эксплуатации произошло ослабление предварительного натяжения оттяжек почти на 90%. Поэтому наблюдается уменьшение в верхних кольцевых ребрах меридиональных напряжений на 27%, кольцевых на 50%. Максимальные приведенные напряжения уменьшаются на 50%. В нижних кольцевых ребрах кольцевые напряжения уменьшаются на 50%, меридиональные остаются без изменений. Приведенные напряжения в нижних кольцевых ребрах уменьшаются на 50%.

Для обеспечения нормальной и безопасной эксплуатации дымовой трубы необходимо выполнить работы по восстановлению и усилению конструкций.

Таблица 4.2 – Итоговые результаты (сравнение по напряжениям)

Этап выбора данных	Максимальные напряжения, МПа		
	меридиональ- ные σ_x	кольцевые σ_y	приведенные σ_{ef}
Оболочка ствола			
Идеальная оболочка	40	56	79
В процессе износа	63	65	110
Отличие, %	58	16	40
Верхнее кольцевое ребро			
Идеальная оболочка	11	24	30
В процессе износа	8	13	15
Отличие, %	27	46	50
Нижнее кольцевое ребро			
Идеальная оболочка	8	35	41
В процессе износа	8	17	18
Отличие, %	0	52	56

За длительный срок эксплуатации (более 30 лет) без капитального ремонта выявленные повреждения оказывают значительное влияние на

напряжения в лацменных узлах. Кольцевые и меридиональные напряжения в стволе трубы увеличиваются в 1,2...1,6 раза. Приведенные напряжения в стволе трубы увеличиваются в 1,4 раза, не превышают расчетное сопротивление для листового проката. За счет ослабления предварительного натяжения оттяжек, в верхних кольцевых ребрах наблюдается уменьшение меридиональных напряжений в 1,4 раза, кольцевых в 2 раза. В нижних кольцевых ребрах кольцевые напряжения уменьшаются в 2 раза, а меридиональные остаются без изменений. Приведенные напряжения в верхних и нижних кольцевых ребер уменьшаются в 2 раза.

4.3 Влияние коррозионного износа на несущую способность стволов дымовых труб с оттяжками

Коррозионный износ является одной из основных причин повреждения дымовых труб на оттяжках. Данный износ приводит к снижению несущей способности и структурной целостности ствола дымовой трубы, что представляет угрозу для безопасности эксплуатации сооружения.

Коррозионный износ в дымовых трубах вызван различными причинами, связанными с условиями эксплуатации и воздействием окружающей среды. Некоторые из основных причин возникновения коррозии в дымовых трубах включают [171]:

1. Химическая коррозия. Контакт дымовых газов с влажным окружающим воздухом или субстанциями, содержащими агрессивные химические компоненты, может привести к химической коррозии металлических стенок дымовых труб. Например, сернистые соединения, содержащиеся в отходах сгорания, могут вызывать серную коррозию.

2. Электрохимическая коррозия. Наличие электролитической среды внутри или внутри и снаружи дымовых труб, такой как конденсат или влажность, может вызывать электрохимическую коррозию. Это происходит из-за возникновения разности потенциалов между различными участками металла и образования анодных и катодных областей.

3. Кислотная коррозия. Образование кислотных соединений в результате

взаимодействия дымовых газов с водяным паром или другими химическими веществами может привести к кислотной коррозии металлических стенок дымовых труб. Кислотные соединения, такие как сернистая кислота и соляная кислота, могут быть основными причинами такого типа коррозии.

4. Коррозия из-за пылевых отложений. Наличие пыли или других загрязнений на внешней поверхности дымовых труб может привести к созданию влажных пятен или концентрации химических веществ, что вызывает коррозию металла.

Приведены основные факторы, определяющие влияние коррозионного износа на несущую способность стволов дымовых труб:

1. Уменьшение толщины стенки. Один из основных эффектов коррозионного износа на несущую способность ствола дымовой трубы связан с уменьшением толщины стенки. Постепенное разрушение материала из-за коррозии приводит к утоньшению стенки, что снижает механическую прочность конструкции. Уменьшение толщины стенки может быть особенно критичным в зоне оттяжек, где концентрируется значительная нагрузка.

В свою очередь, влияние уменьшения толщины стенки заключается в следующем:

а) Увеличение напряжений. С уменьшением толщины стенки дымовой трубы происходит увеличение напряжений, вызванных нагрузками и деформациями. Оттяжки, особенно в зоне с утоньшенной стенкой, испытывают большую нагрузку, что может привести к перегрузке и деформациям конструкции.

б) Снижение резерва прочности. Уменьшение толщины стенки дымовой трубы сокращает резерв прочности материала. Резерв прочности - это разница между максимально возможной нагрузкой, которую конструкция может выдержать без повреждений, и фактической нагрузкой, которой она подвергается. С уменьшением толщины стенки резерв прочности сокращается, что делает конструкцию более уязвимой к нагрузкам на оттяжки.

в). Угроза нарушения целостности. Если толщина стенки дымовой трубы становится недостаточной для выдерживания нагрузок от оттяжек, возникает

угроза нарушения целостности конструкции. Это может привести к разрывам, трещинам или деформациям ствола трубы, что в свою очередь приводит к поломке или полной потере функциональности трубы.

г). Повышенный риск аварий. Коррозионный износ и уменьшение толщины стенки дымовой трубы увеличивают риск возникновения аварийных ситуаций. Структурные повреждения и нарушение несущей способности.

2. Снижение прочности материала: Коррозия не только уменьшает толщину стенки, но и ослабляет механические свойства материала. Металлический материал, подверженный коррозии, может терять свою прочность и устойчивость к нагрузкам. Это может привести к возникновению деформаций, напряжений и даже разрушению ствола трубы в зоне оттяжек.

3. Появление трещин: Коррозия может стать источником образования трещин в стволе дымовой трубы. Это может происходить как из-за внешних механических нагрузок на конструкцию, так и из-за изменения свойств материала вследствие коррозии. Появление трещин может существенно снизить несущую способность ствола трубы и способствовать дальнейшему распространению повреждений.

4. Снижение сопротивления усталости. Коррозия снижает сопротивление усталости материала ствола, соответственно труба становится более подверженной разрушению при циклических нагрузках, что может привести к ухудшению ее несущей способности.

На основании проведенных численных исследований, представленных в п.4.1, 4.2, определено влияние повреждений на несущую способность дымовых труб с оттяжками. Схема влияния выявленных повреждений приведена на рисунке 13.

Коррозионный износ ствола дымовой трубы с оттяжками проявляется в виде равномерного и неравномерного износа, а также износа в лацменных узлах. Равномерный износ характеризуется равномерным утоньшением толщины стенки ствола на протяжении его высоты, в то время как неравномерный износ приводит к локальным изменениям толщины стенки.

Оба вида износа ствола, будь то равномерный или неравномерный, оказывают негативное влияние на жесткостные характеристики конструкции. Снижение жесткости ствола дымовой трубы приводит к увеличению напряжений, которые возникают в результате нагрузок, и в долгосрочной перспективе может привести к разрушению ствола трубы.

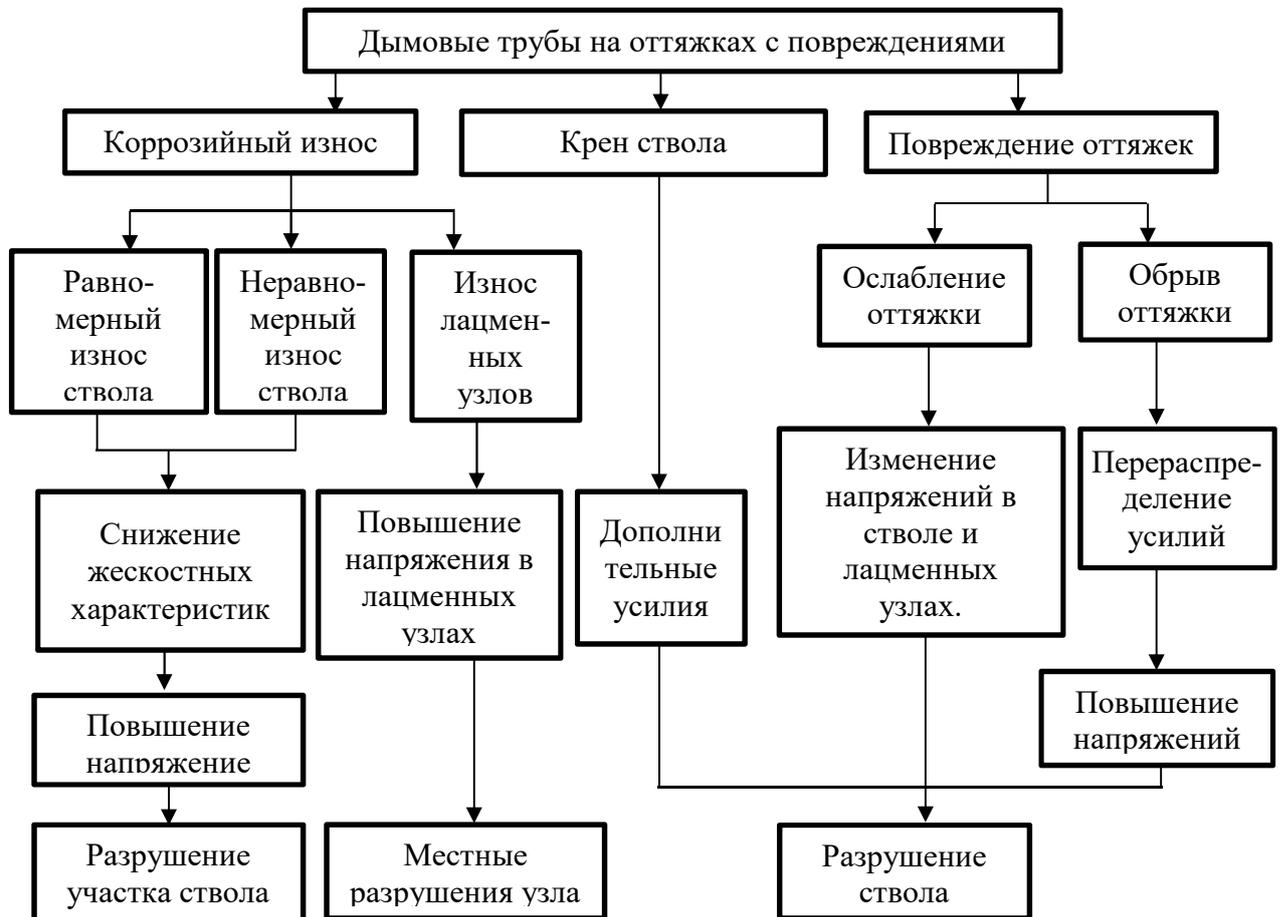


Рисунок 4.22 – Влияния выявленных повреждений на несущую способность дымовых труб с оттяжками

Износ в лацменных узлах является еще одной серьезной проблемой, связанной с коррозионным износом ствола дымовой трубы. Этот вид износа приводит к повышению напряжений в узлах соединения и может привести к местным разрушениям узла. Лацменный узел имеет важное значение для надежной работы всей дымовой трубы, поскольку он обеспечивает крепление оттяжек и распределение нагрузок по конструкции.

При коррозионном износе в лацменных узлах дымовой трубы происходят изменения параметров соединения и повышение напряжений. Данный вид

износа может привести к местным разрушениям кольцевых ребер.

Местные разрушения кольцевых ребер в лацменных узлах оказывают серьезное негативное влияние на несущую способность дымовой трубы. В результате, возможна потеря несущей способности всего сооружения из-за увеличения напряжений в других участках дымовой трубы и возникновения дополнительных повреждений. Эти разрушения приводят к снижению жесткости и надежности конструкции, а также могут вызывать деформации и повреждения ствола.

Важно отметить, что не только локальные повреждения, но и общий коррозионный износ ствола дымовой трубы до определенного уровня могут оказывать существенное влияние на несущую способность. При снижении толщины стенки из-за коррозии возрастают напряжения в оболочке, что может стать причиной возникновения разрушений и потери несущей способности.

Таким образом, коррозионный износ ствола дымовой трубы, будь то равномерный, неравномерный, а также износ в лацменных узлах, представляет серьезную угрозу для работы и безопасности сооружения в целом. Оценка и контроль степени износа являются неотъемлемыми элементами для поддержания несущей способности и надежности дымовой трубы с оттяжками.

4.4 Выводы по разделу IV.

На основании проведенного исследования влияния повреждений лацменного узла на несущую способность дымовых труб с оттяжками были получены следующие выводы:

1. Коррозионный износ кольцевых ребер лацменного узла до 50% вызывает значительное увеличение приведенных напряжений в этих ребрах. Для дымовых труб с соотношением диаметра трубы к высоте от $1/64$ до $1/33$, наблюдается увеличение приведенных напряжений в кольцевых ребрах в 2 - 2,2 раза. Это указывает на значимое влияние коррозионного износа на прочностные характеристики и несущую способность лацменного узла дымовых труб.

2. Коррозионный износ стенки дымовой трубы в уровне лацменного узла, а также при совместном провисании оттяжек, приводят к увеличению

приведенных напряжений в стволе трубы в 1,4 раза. В результате ослабления предварительного натяжения оттяжек, приведенные напряжения в кольцевых ребрах уменьшаются в 2 раза. Это подчеркивает важность поддержания предварительного натяжения оттяжек для обеспечения оптимальных прочностных характеристик лацменного узла и ствола дымовой трубы.

3. Выполненные исследования подтверждают необходимость оценки и контроля состояния лацменного узла дымовых труб с оттяжками, особенно в отношении коррозионного износа кольцевых ребер и ослабления предварительного натяжения оттяжек. Такие меры позволят обеспечить сохранение несущей способности и прочности конструкции, а также гарантировать безопасность в эксплуатации дымовых труб.

РАЗДЕЛ V. НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ДЫМОВЫХ ТРУБ ПРИ ОБСЛУЖИВАНИИ И УСИЛЕНИИ

5.1. Эффективность усиления лацменных узлов дымовых труб

Эффективность усиления лацменных узлов дымовых труб играет ключевую роль в обеспечении их несущей способности и долговечности. При правильно выполненном усилении, этот узел способен выдерживать значительные нагрузки, возникающие в процессе эксплуатации.

В соответствии с указаниями [98], усиление конструкций проводится с целью снижения внутренних напряжений в конструкции при заданных нагрузках. Анализ разработанных и практически применяемых методов усиления позволяет классифицировать разнообразие конкретных решений на следующие группы:

-усиление без значительного изменения конструктивных форм и расчетных схем (увеличение сечений конструкций и их элементов);

-усиление с изменением конструктивных и расчетных схем (регулирование напряжений в элементах существующих конструкций), такие как добавление дополнительных опор, изменение расчетной схемы или использование предварительно напряженных элементов.

Расчет элементов усиления конструкций осуществляется по методу предельных состояний и с учетом действующих норм. Целью расчета является обеспечение прочности и устойчивости конструкций, а также ограничение их деформаций.

Важными факторами, влияющими на эффективность усиления лацменного узла, являются выбор материалов и методов усиления. При выборе материалов необходимо учитывать их прочностные характеристики, устойчивость к коррозии и другим агрессивным воздействиям окружающей среды. Оптимальный выбор материалов позволяет достичь баланса между прочностью и весом конструкции.

В процессе усиления лацменных узлов используются различные методы, такие как применение сварочных работ, установка металлических вставок или наложение усиливающих пластин. Выбор метода зависит от конкретных условий и требований, а также от доступности необходимого оборудования и квалифицированного персонала.

Критерии эффективности усиления лацменных узлов включают в себя повышение несущей способности конструкции, снижение деформаций и напряжений, а также улучшение устойчивости к динамическим нагрузкам и вибрации. Это позволяет обеспечить надежность работы дымовых труб и минимизировать риск возникновения аварийных ситуаций.

Для оценки эффективности усиления лацменных узлов проводятся инженерные расчеты, включающие статическую и динамическую нагрузку. Полученные результаты сравниваются с требованиями нормативных документов и стандартов, чтобы убедиться в соответствии усиленной конструкции установленным требованиям безопасности и надежности.

Таким образом, эффективность усиления лацменных узлов дымовых труб является важным аспектом процесса проектирования и ремонта.

Соответствующий выбор материалов и методов усиления, а также проведение необходимых расчетов и испытаний, обеспечивает оптимальную работу и долговечность данного узла, что является гарантией безопасности и эффективной эксплуатации дымовых труб.

5.2. Исследование напряженно-деформированного состояния дымовых труб при усилении

На напряженно-деформированное состояние дымовых труб значительное влияние оказывают диаметры оттяжек, предварительные напряжения оттяжек, угол наклона оттяжек к горизонтали и усиление конструкций. Данные исследования позволяют определить наиболее рациональные конструктивные решения дымовых труб с двумя уровнями оттяжек при восстановительных работах.

Приведены конструктивные решения по восстановлению дымовых труб,

высотой до 100 м, позволяющие выполнить усиление лацменных узлов, натяжение и замену оттяжек в двух уровнях.

5.2.1 Исследование влияния диаметра оттяжек.

Изучено влияние изменения диаметра катана оттяжки на напряженно-деформированное состояние дымовой трубы. Интервалы варьирования факторов эксперимента и полученные кривые изображены на рис. 5.1, 5.2.

Установлено, что напряжение в оттяжках уменьшается пропорционально квадрату диаметра оттяжек, и соответственно, усилие в оттяжках увеличиваются. При диаметре от 21 до 36 мм усилие в оттяжках увеличиваются для трёх оттяжек на 33 % для 1-го уровня и 46 % для 2-го уровня оттяжек (рис. 5.1а), для четырех оттяжек в плане на 33 % для 1-го уровня, 36 % для 2-го уровня (рис. 5.1б).

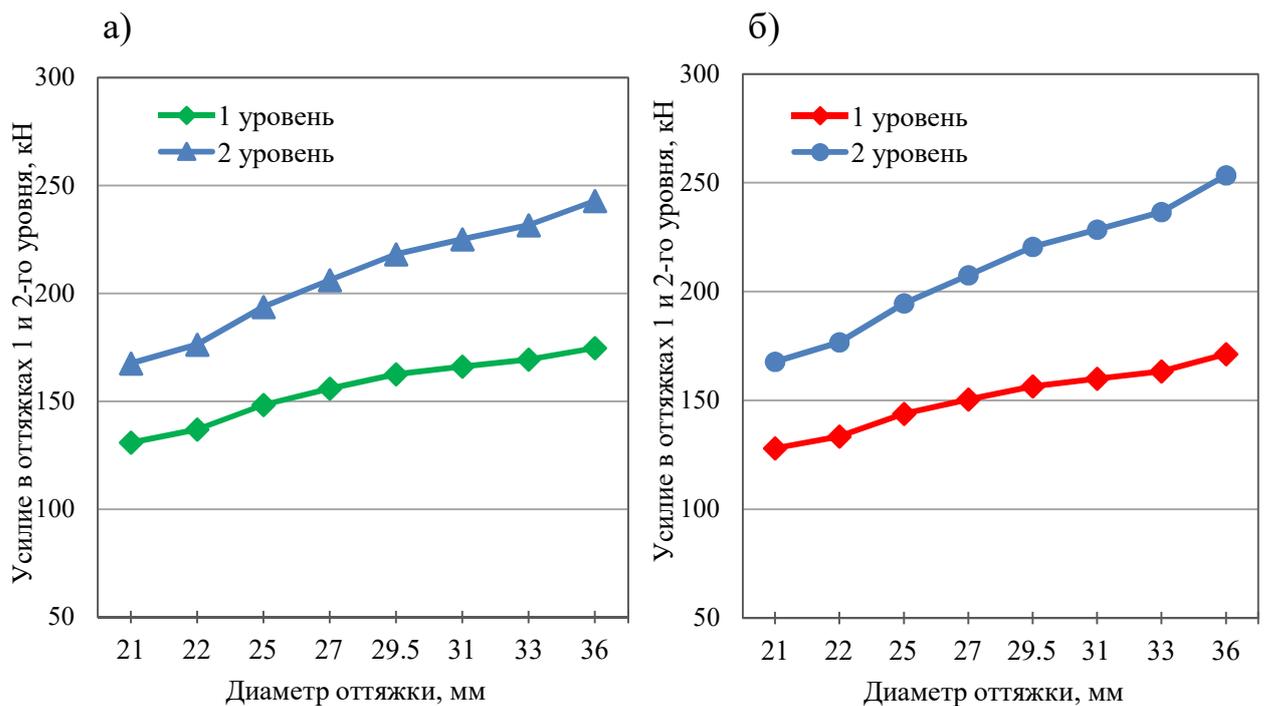


Рисунок 5.1 – Зависимость изменения усилия в оттяжках 1 и 2-го уровня при разных диаметрах (ветровая нагрузка и температура -40°C при нагреве ствола): а) с тремя оттяжками; б) с четырьмя оттяжками в плане

Изгибающие моменты и напряжения в стволе трубы при расчетном сочетании ветровой нагрузки и температуры $+40^{\circ}\text{C}$ уменьшаются пропорционально величине диаметра оттяжки (рис. 5.2). При диаметре оттяжек

от 21 до 36 мм изгибающие моменты в стволе трубы уменьшаются для трёх оттяжек на 48 %, для четырёх – 46 % (рис. 5.2а), а напряжения для трёх на 37 %, для четырёх – 35 % (рис. 5.2б). С учетом экономии материала и условия снижения нагрузки от предварительного натяжения на основание, рационально принимать диаметр оттяжек 25-31 мм.

Разница напряжения в стволе дымовой трубы для трех и четырех оттяжек в узле составляет 2% при ветровой нагрузки на оттяжку. Далее в работе рассматривается напряжения для четырех оттяжек в узле.

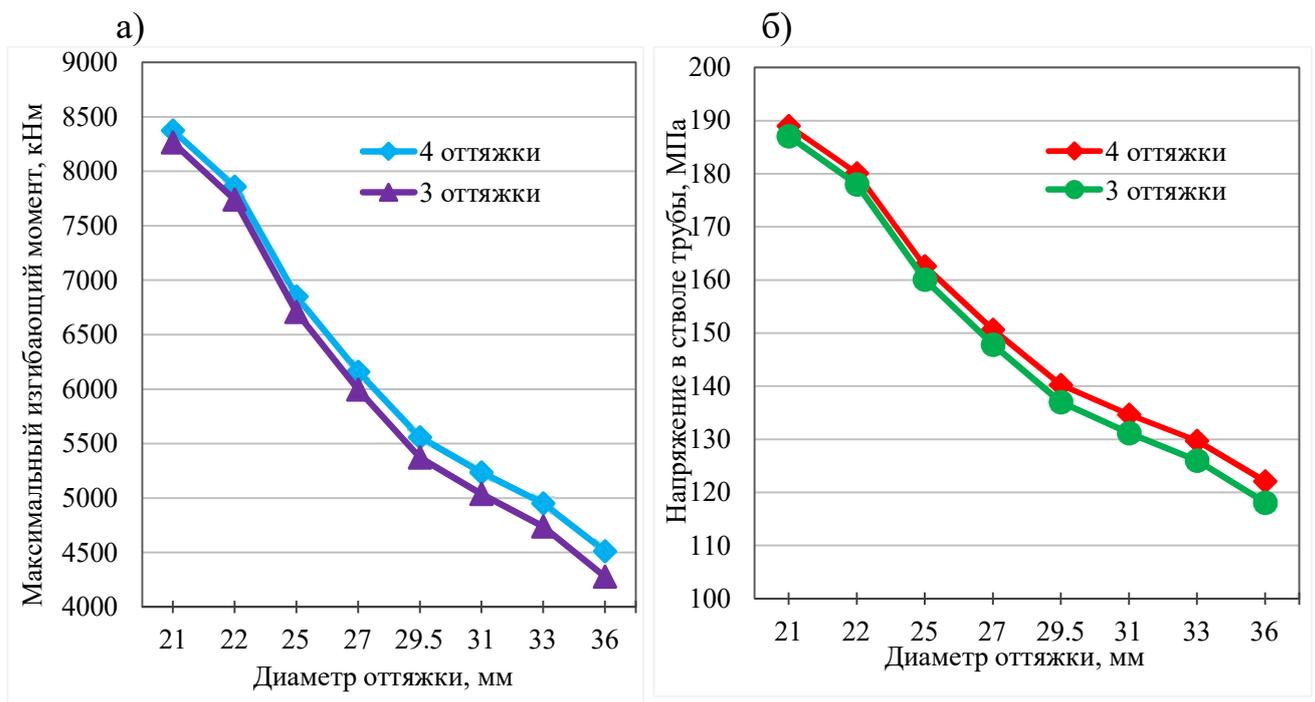


Рисунок 5.2 – Зависимость изменения изгибающего момента (а) и напряжения (б) в стволе трубы при разных диаметрах оттяжек с тремя и четырьмя оттяжкам в узле (ветровая нагрузка и температура +40°C)

По результатам численных исследований получена зависимость для определения диаметра оттяжек:

$$d = 16,6 + 0,115H, \text{ мм} \quad (4.1)$$

где H – общая высота трубы, м;

5.2.2 Исследование предварительных напряжений оттяжек

Ключевым этапом проектирования дымовой трубы, определяющим эффективность конструктивного решения, является определение рациональных величин предварительных натяжений оттяжек.

Начальное натяжение обеспечивает требуемую жесткость ствола, регулирует величины изгибающих моментов в стволе, оказывает влияние на частоту собственных колебаний конструкций, то есть на величину пульсационной составляющей ветровой нагрузки [115].

Значение предварительного напряжения определяется на начальном этапе расчета после определения нагрузок. Затем, после выполнения расчетов при различных сочетаниях нагрузок, определения величин деформаций ствола, величины предварительных натяжений корректируются.

Недостаточное натяжение оттяжек приводит к повышенной деформативности ствола и общим чрезмерным колебаниям конструкций. Завышенное натяжение – увеличивает напряжения в отдельных элементах конструкций, что в отдельных случаях приводит к появлению трещин, и создает неоправданно высокие постоянные нагрузки на фундамент.

На рис. 5.3, 5.4 приведены диаграммы изменения изгибающих моментов в стволе трубы при варьировании предварительного напряжения оттяжек для четырех оттяжек в узле и диаметре оттяжек 25 мм и 31 мм. При ослаблении напряжения оттяжек наблюдается резкое возрастание изгибающего момента. Далее, при увеличении предварительного напряжения (от 40/68МПа) в 3 раза, происходит плавное уменьшение изгибающего момента на 15 % при диаметре 25 мм; на 22% при диаметре оттяжек 31 мм.

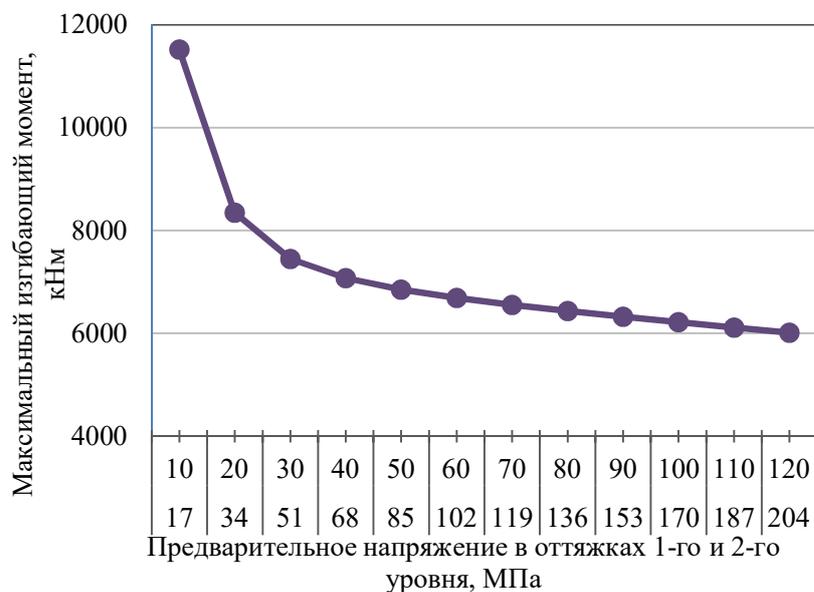


Рисунок 5.3. – Максимальные изгибающие моменты при изменении предварительного напряжения оттяжек (диаметр оттяжек 25 мм)

Зависимость изменения напряжений в стволе трубы при варьировании предварительного напряжения оттяжек для диаметра оттяжек 25 мм и 31 мм изображена на рис.5.5. Большие величины изгибающего момента могут привести к потере несущей способности дымовой трубы. В период эксплуатации предварительное натяжение оттяжек подвергается ослаблению, это необходимо учитывать при определении напряжения оттяжек. Таким образом, наиболее рационально принимать предварительное напряжение, которое соответствует горизонтальному участку графика в пределах 60-100 МПа для 1-го уровня и 102-170 МПа для второго.

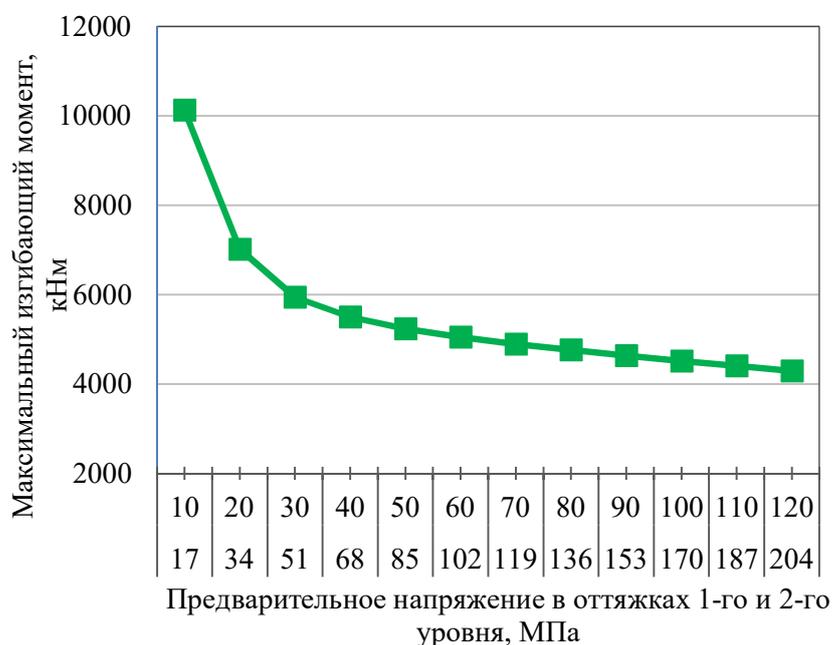


Рисунок 5.4 – Максимальные изгибающие моменты при изменении предварительного напряжения оттяжек (диаметр оттяжек 31 мм).

При использовании оттяжек диаметром 31 мм и полученного выше предварительного напряжения оттяжек, напряжение в стволе трубы снижается до 20% по сравнению с диаметром оттяжек 25 мм (рис. 5.5).

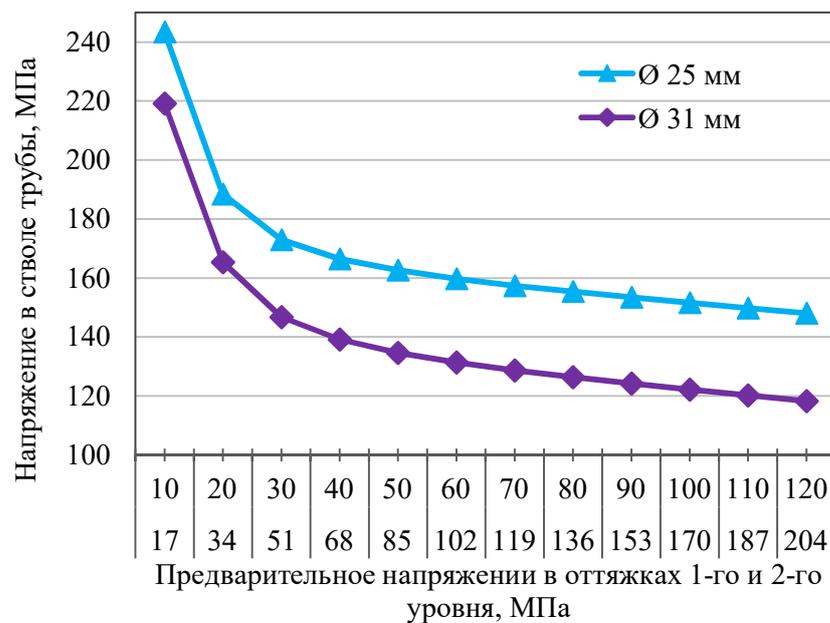


Рисунок 5.5 – Зависимости напряжений в стволе дымовой трубы от предварительного напряжения оттяжек при диаметре 25 и 31 мм (ветровая нагрузка и температура +40°C)

Анализ оттяжек диаметром 25 мм и 31 мм позволяет сделать вывод о том, что чем больше диаметр оттяжек, тем меньше предварительное напряжения в них, и соответственно, меньше оттяжки будут ослабевать в период эксплуатации. Величину начального натяжения оттяжек можно регулировать конструктивно путем изменения угла наклона оттяжки к горизонтали.

По результатам численных исследований получены зависимости для определения предварительного напряжения оттяжек:

$$\text{- для первого уровня оттяжек } \sigma_{01} = -10,882 + 0,8088H, \text{ МПа} \quad (4.2)$$

$$\text{- для второго уровня оттяжек } \sigma_{02} = -19,706 + 1,397H, \text{ МПа} \quad (4.3)$$

где H – общая высота трубы, м;

5.2.3 Исследование влияния угла наклона оттяжки к горизонтали.

В работе рассмотрено влияние заданной величины предварительного напряжения (для первого уровня 70 МПа, для второго – 120 МПа) при различных углах наклона оттяжки к горизонтали на напряжения в оттяжках, изгибающие моменты и напряжение в стволе трубы. Диаметр оттяжки 31 мм. Интервалы углов и полученные зависимости изображены на рис. 5.6, 5.7.

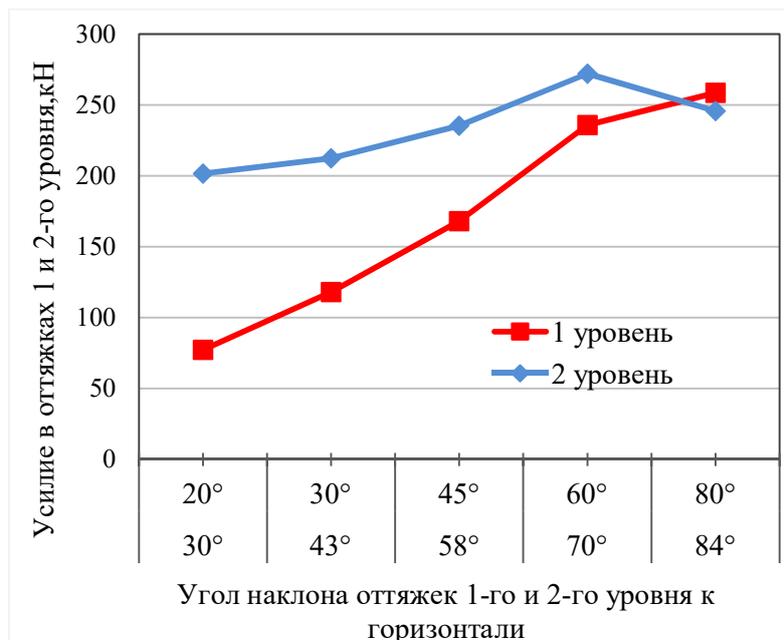


Рисунок 5.6 – Зависимости изменения усилий в оттяжках при различных углах наклона оттяжек к горизонтали (ветровая нагрузка и температура -40°C при нагреве ствола).

Величина усилия 1-го уровня оттяжек при углах наклона к горизонтали от 20° до 80° увеличивается в 3,4 раза. Соответственно, для 2-го уровня оттяжек при углах наклона от 20° до 84° усилие в оттяжках увеличивается в 1,3 раза. При углу наклона оттяжек $80^{\circ}/84^{\circ}$ усилия в оттяжках почти одинаковой величины, наблюдается ослабление второй оттяжки.

Минимальные изгибающие моменты в стволе трубы возникает при углах наклона оттяжек близком $30^{\circ}/43^{\circ}$ - $45^{\circ}/58^{\circ}$, максимальный – при углу $80^{\circ}/84^{\circ}$ (рис. 5.7 а). Зависимости изменения напряжений в стволе с четырьмя оттяжками в плане при различных углах наклона оттяжек к горизонтали изображена на рис. 5.7 б. При увеличении угла наклона к горизонтали от 20° до 84° напряжения в стволе трубы возрастает в 2,5-2,6 раза.

Анализ полученных результатов показал, что с учетом экономии используемой площадки строительства, рационально принимать угол наклона оттяжек в пределах приближенном к $45^{\circ}/58^{\circ}$, соответственно на расстоянии от оси ствола трубы от 40 до 60 м.

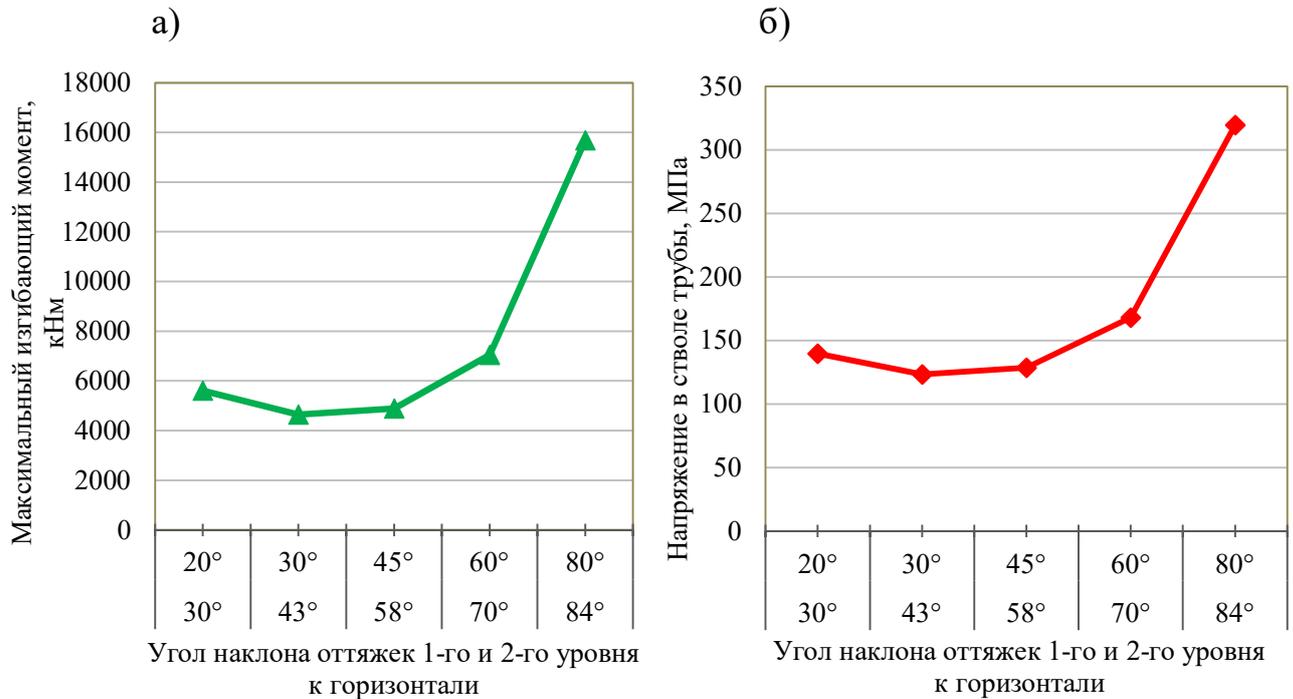


Рисунок 5.7 – Зависимость изменения изгибающих моментов (а) и напряжений (б) в створе трубы при различных углах наклона оттяжек к горизонтали (ветровая нагрузка и температура +40°C)

5.2.4 Определение конструктивных решений усиления лацменных узлов дымовых труб

В данной работе актуальным является усиление лацменного узла второго уровня оттяжек методом усиления без существенного изменения конструктивных форм и расчётных схем. Однако, методика расчёта усиления данного вида конструкций отсутствует. Поэтому была разработана схема усиления дымовой трубы с помощью вертикальных кольцевых ребер и накладок толщиной 6 мм, и представлена на рисунках 5.8, 5.9. На рисунке 5.10 представлена реализованная конструкция усиления лацменного узла в процессе монтажа.

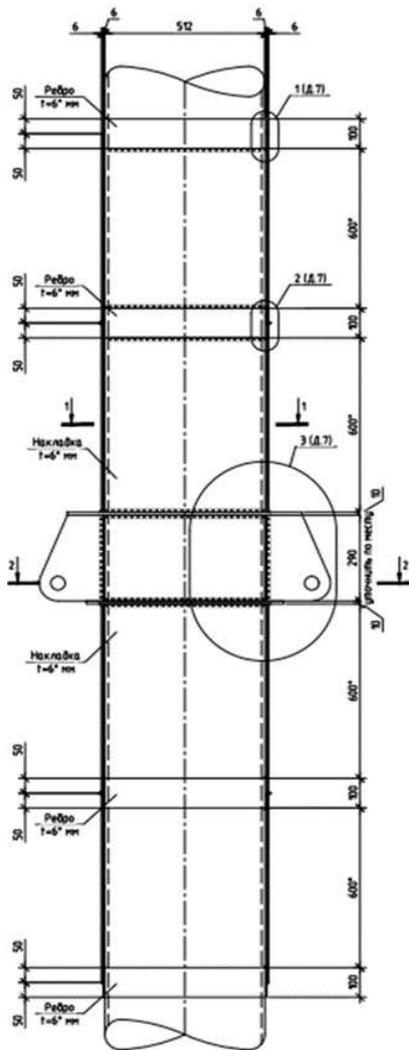


Рисунок 5.8 – Схема элементов усиления лацменного узла

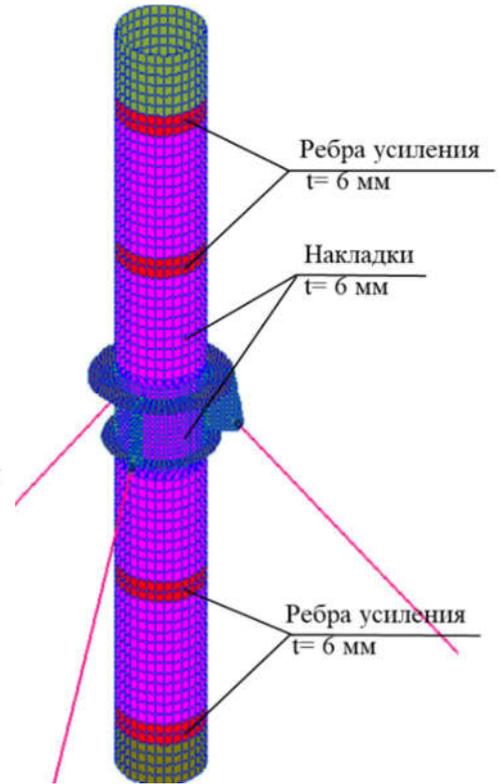
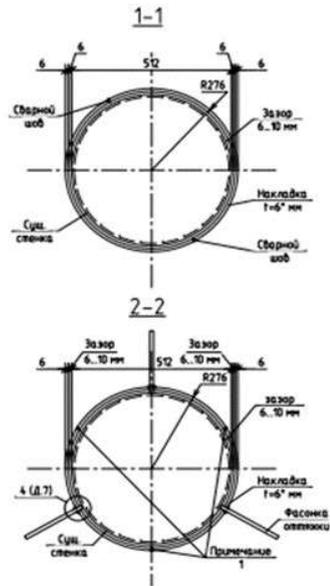


Рисунок 5.9 – Моделирование элементов усиления в ПК LIRA



Рисунок 5.10 – Усиление лацменного узла накладками

В качестве оценки влияния усиления на НДС оболочки на рисунке 5.11 представлены максимальные напряжения в лацменном узле после усиления. Меридиональные напряжения в стволе для данного вида усиления уменьшаются на 51%, кольцевые на 25%. Приведенные напряжения в стволе трубы уменьшаются на 45%.

За счет натяжения провисающих оттяжек, в верхнем и нижнем кольцевом ребре лацменного узла наблюдается увеличение меридиональных напряжений на 20-50%, кольцевых в 2,8 раза. Приведенные напряжения в кольцевых ребрах увеличиваются в 2,8 раза и не превышают расчетное сопротивление для листового проката.

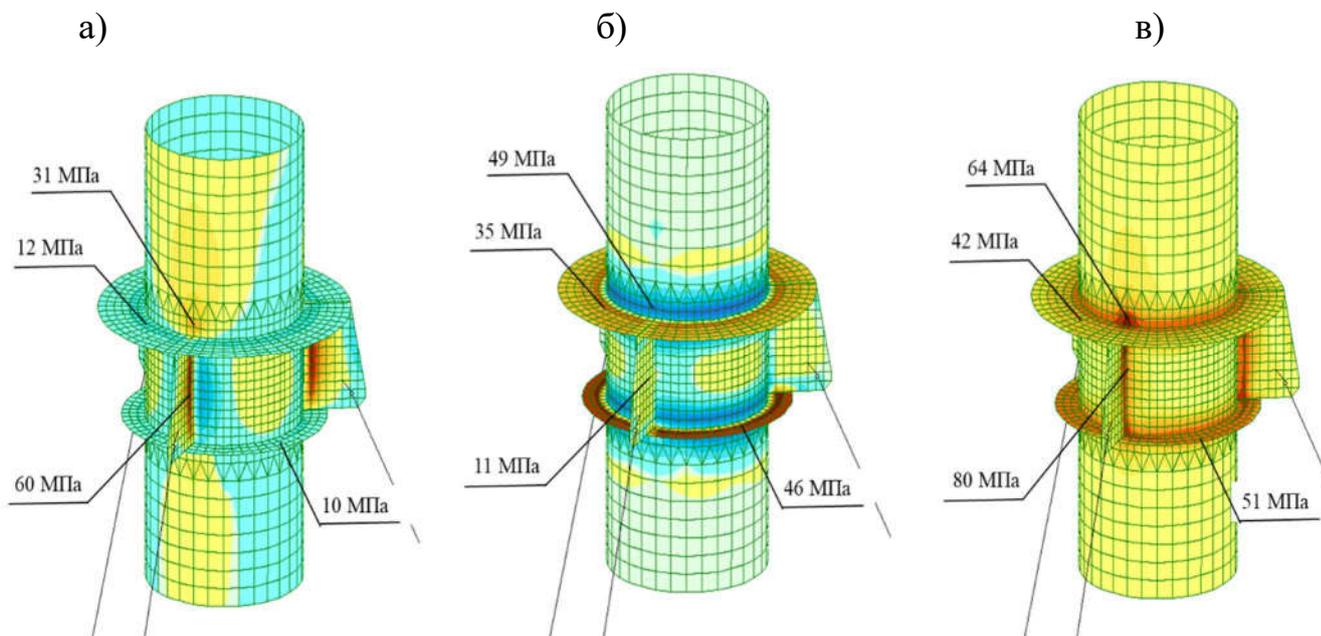


Рисунок 5.11 - Максимальные напряжения в элементах лацменного узла после усиления: а) меридиональные напряжения σ_x , б) кольцевые напряжения σ_y , в) приведенные напряжения σ_{ef} .

На рисунках 5.12-5.14, представлены диаграммы изменения напряжений в элементах лацменного узла (ствол, кольцевые ребра) при изменении толщины накладок усиления. При увеличении толщины накладок от 5 до 10 мм меридиональные напряжения в стволе трубы уменьшаются на 25 %, кольцевые на 33%. Приведенные напряжения в стволе трубы уменьшаются на 30%. Меридиональные и кольцевые напряжения верхнего кольцевого ребра увеличиваются на 43-51%. Приведенные напряжения верхнего кольцевого ребра увеличиваются на 52%. В нижнем кольцевом ребре меридиональные и кольцевые напряжения увеличиваются на 32-39%, соответственно приведенные напряжения на 53%.

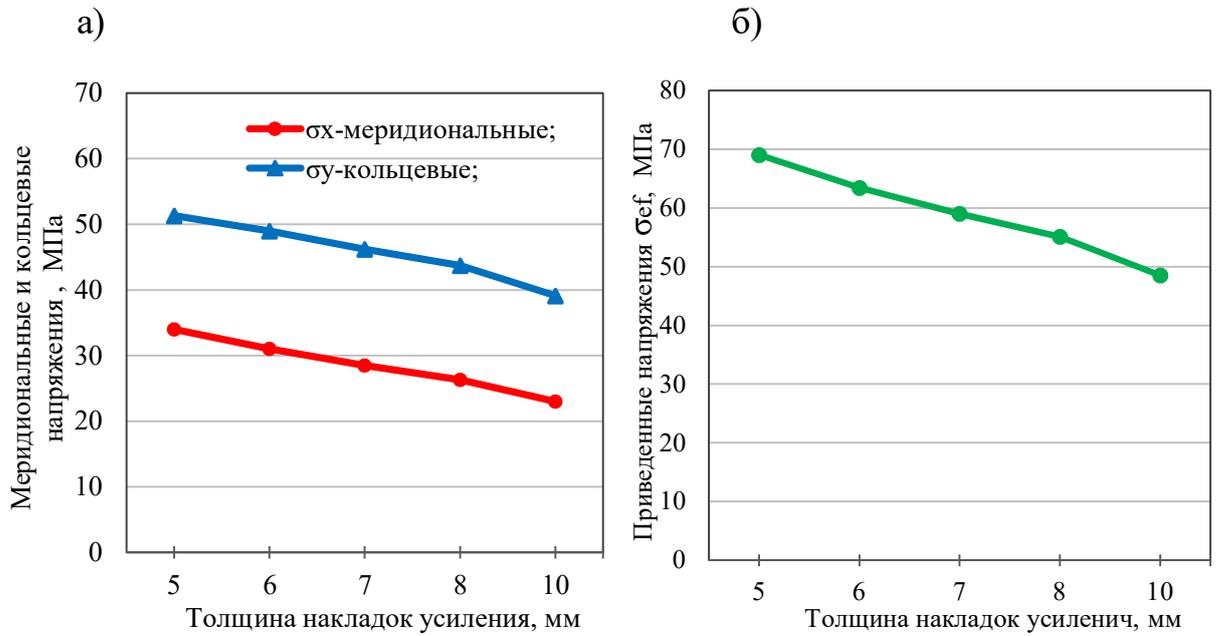


Рисунок 5.12 – Зависимость изменения напряжений в оболочке:

а) меридиональных и кольцевых напряжений; б) приведенных напряжений.

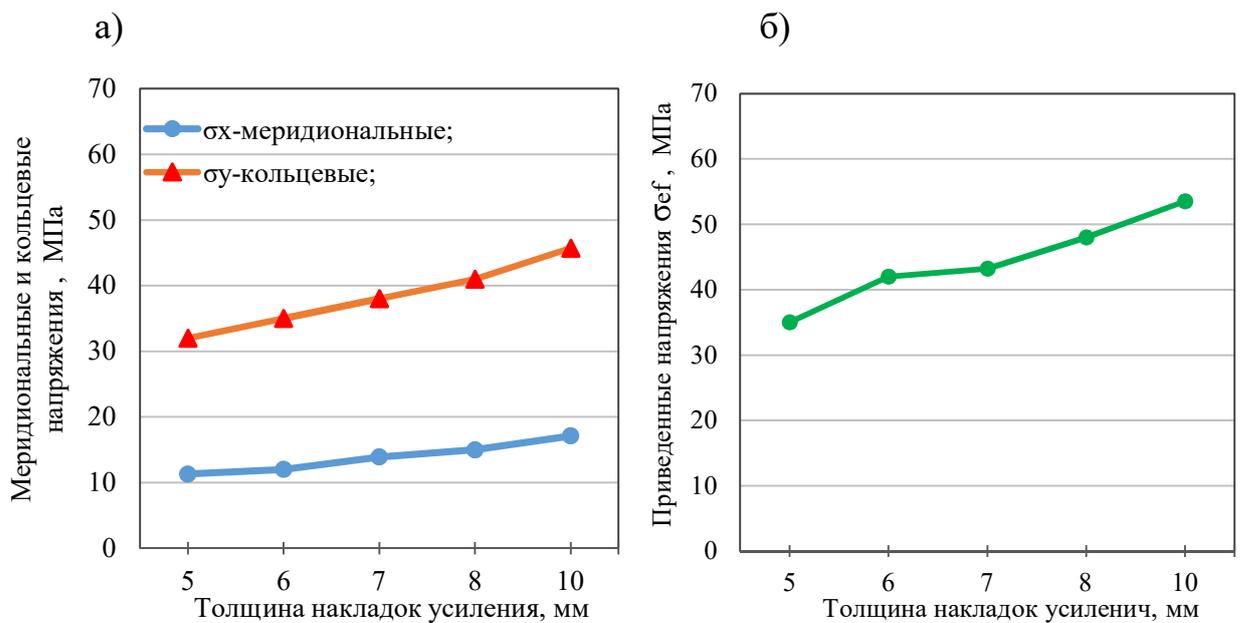


Рисунок 5.13 – Зависимость изменения напряжений в верхнем кольцевом ребре:

а) меридиональных и кольцевых напряжений; б) приведенных напряжений.

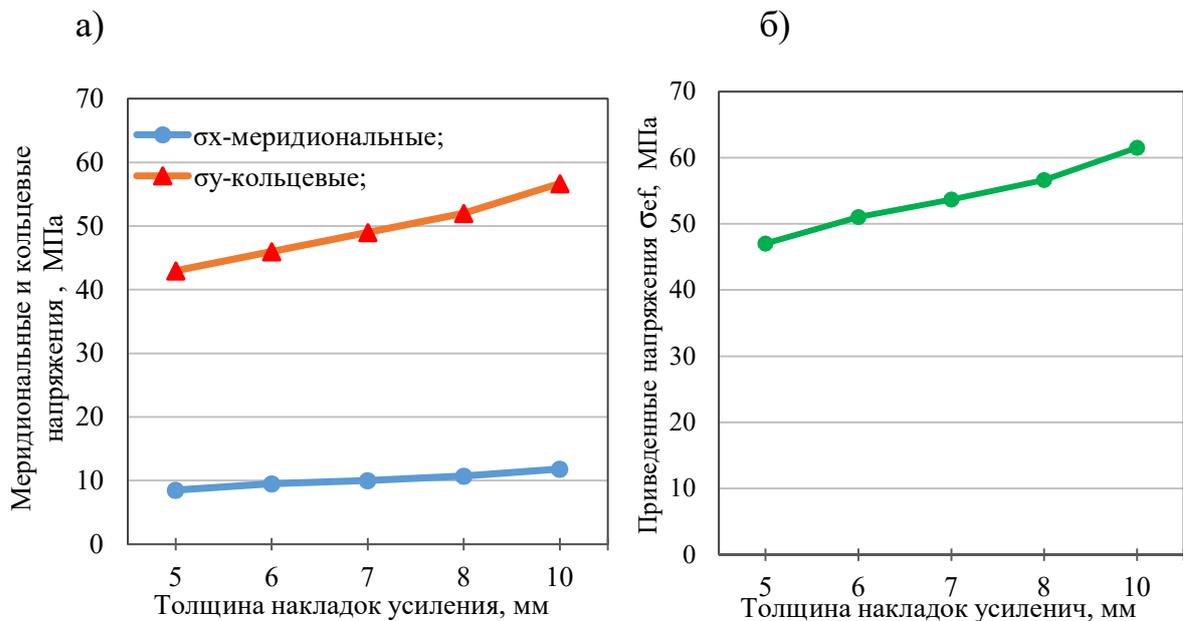


Рисунок 5.14 – Зависимость изменения напряжений в нижнем кольцевом ребре на участке сопряжения с цилиндром: а) меридиональных и кольцевых напряжений; б) приведенных напряжений.

По результатам численных исследований выведены зависимости приведенных напряжений при усилении лацменного узла накладками:

$$\text{- напряжение в стволе трубы } \sigma = 88,1 - 4,04 \cdot t, \text{ МПа} \quad (4.4.)$$

$$\text{- напряжение в кольцевом ребре } \sigma = 33,5 - 2,85 \cdot t, \text{ МПа} \quad (4.5)$$

где t – толщина накладки усиления, мм

5.3 Методика оценки несущей способности дымовых труб с оттяжками с учётом износа и технического обслуживания

В данной работе основным подходом, определяющим надежность сооружения, является отсутствие отказа. Критерии отказа проверяется с помощью методики предельных состояний, согласно действующих норм расчета стальных конструкций. [52].

Классификация предельных состояний конструкций дымовых труб согласно норм [117] следующая:

- первая группа предельных состояний - состояния, превышение которых ведет к разрушению любого характера (пластичное, хрупкое, усталостное), к исчерпанию несущей способности, потере местной или общей устойчивости;

- вторая группа предельных состояний - состояния, при превышении которых нарушается нормальная эксплуатация трубы, сокращается долговечность или нарушаются условия комфортности. Данная группа характеризуется наличием предельных деформаций и перемещений.

Классификация предельных состояний элементов дымовых труб представлена в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Классификация предельных состояний элементов дымовых труб

Вид конструкции	Элементы	Группа предельных состояний	Критерии отказа
Несущие элементы	в целом дымовая труба	2	4. Отсутствие обеспечения технологических функций
	оболочка трубы	1, 2*	1. Вязкое разрушение
		1, 2*	2. Потеря устойчивости в следствии геометрических отклонений
	стыки сопряжения оболочек	1, 2*	3. Усталостная трещина
	узлы	1, 2*	1. Вязкое разрушение при появлении краевых напряжений
Средства доступа	элементы площадок и лестниц	1, 2*	1. Вязкое разрушение

Примечание: * - для сооружения в целом

На расчетный уровень напряжений значительное влияние оказывает коэффициент надежности по ответственности γ_n , который зависит от категории ответственности. В зависимости от последствий, вызванных отказом, выделяют три категории ответственности конструкций и элементов [51]:

А – конструкции, отказ которых может привести к полной непригодности эксплуатации (обрушению) сооружения в целом;

Б – конструкции, отказ которых может привести к снижению несущей способности сооружения в целом или отказу цилиндрической оболочки трубы;

В – конструкции, отказы которых не приводят к нарушению функционирования других конструкции и их элементов.

В составе категории А выделяются конструкции категории А1 к которым относятся главные несущие конструкции. Безотказность данной категории обеспечивает сооружение от полного обрушения при аварийных влияниях.

У категории А относятся конструкции и элементы, отказ которых может стать причиной аварийной ситуации с прямой угрозой для людей или окружающей среды.

Для конструкций категории А рекомендуется использовать дополнительные принципы гарантирования безопасности. [51]

Классификация конструкций по категориям ответственности дымовых труб с оттяжками следующая:

1. Ствол дымовой трубы – категории А1 и А.
2. Оттяжки – категория А.
3. Лестницы и площадки – категория В.

На рисунке 5.15 представлена опасность повреждений элементов и техническое состояние дымовой трубы.

Методика оценки несущей способности дымовых труб на оттяжках с учетом износа и технического обслуживания является важным инструментом для определения состояния и оценки работоспособности конструкций. Данный подход позволяет учесть влияние износа и процессов технического обслуживания на несущие свойства дымовых труб, что в свою очередь способствует обеспечению их безопасной и эффективной эксплуатации.

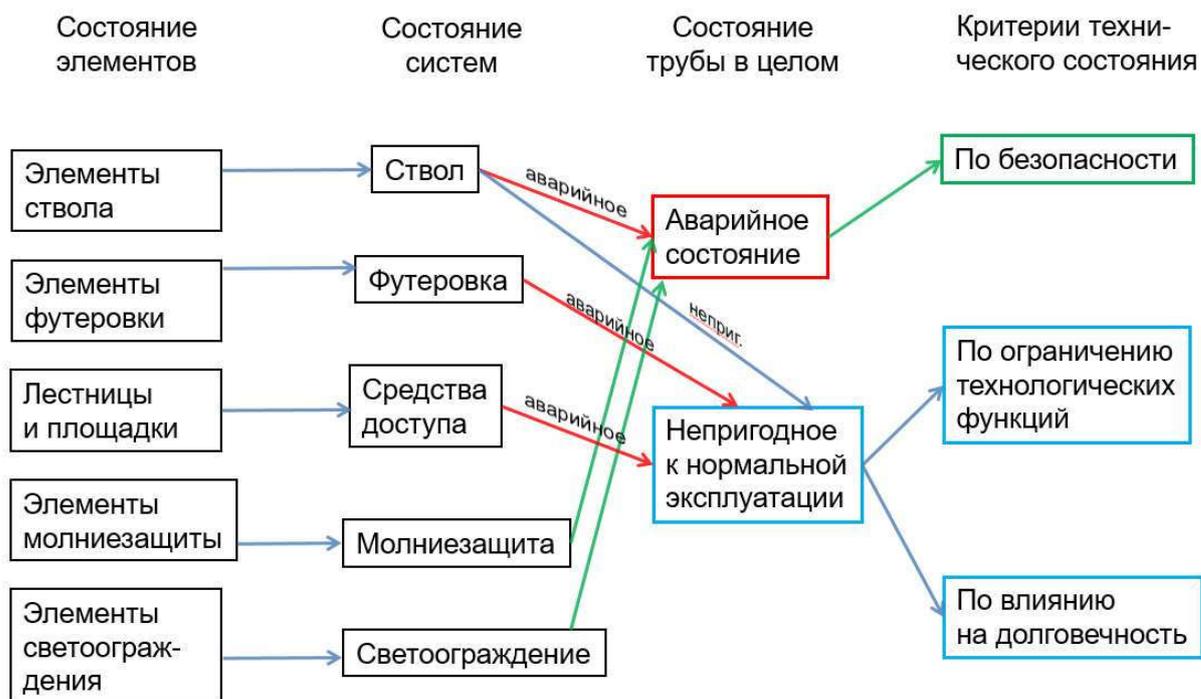


Рисунок 5.15 – Опасность повреждений элементов и техническое состояние дымовой трубы

Основой методики является системный подход, который включает в себя следующие этапы:

1. Определение критериев оценки несущей способности. В данном этапе устанавливаются основные показатели, по которым будет проводиться оценка несущей способности дымовых труб с оттяжками. Эти показатели включают в себя уровень износа материалов, изменения геометрических параметров, напряжения и деформации конструкции.

2. Сбор и анализ данных. На этом этапе производится сбор информации о текущем состоянии дымовых труб и их оттяжек. Это может включать в себя визуальный осмотр, измерение параметров, испытания на прочность и другие технические методы. Полученные данные анализируются для определения уровня износа, наличия дефектов и других факторов, влияющих на несущую способность.

3. Моделирование и поверочные расчеты. На основе собранных данных проводятся математическое моделирование и расчеты, направленные на определение несущей способности дымовых труб с учетом износа и технического обслуживания. В этом процессе используются соответствующие

инженерные методы, учитывающие механические свойства материалов, геометрию конструкции, нагрузки и другие важные параметры.

4. Оценка безопасности и принятие решений. После проведения расчетов и моделирования производится оценка безопасности дымовых труб с оттяжками. На основе полученных результатов и установленных критериев оценки принимаются решения о дальнейшей эксплуатации, ремонте или замене конструкций. Важным аспектом является соблюдение соответствующих норм и стандартов, которые регулируют процессы технического обслуживания и безопасность работы дымовых труб.

Мероприятия по обслуживанию конструкций проводятся с целью предупреждения износа и устранения его последствий. Эти мероприятия входят в область технического надзора, который включает ряд действий и проверок:

1. Надзор за ремонтом. Осуществляется контроль и наблюдение за процессом ремонта конструкций, чтобы убедиться в правильном выполнении ремонтных работ и соответствии требованиям.

2. Осмотры. Проводятся визуальные осмотры конструкций для выявления видимых признаков износа.

3. Контроль технических характеристик. Осуществляется проверка различных технических параметров конструкций. В контексте данной задачи, это включает контроль оттяжек, то есть проверку их состояния и натяжения, контроль толщины оболочек, чтобы обнаружить и измерить износ, контроль крена ствола, а также контроль состояния лацменного узла с целью выявления повреждений.

Все эти мероприятия помогают поддерживать работоспособность конструкций, предотвращать преждевременный износ и обеспечивать их безопасность и долговечность.

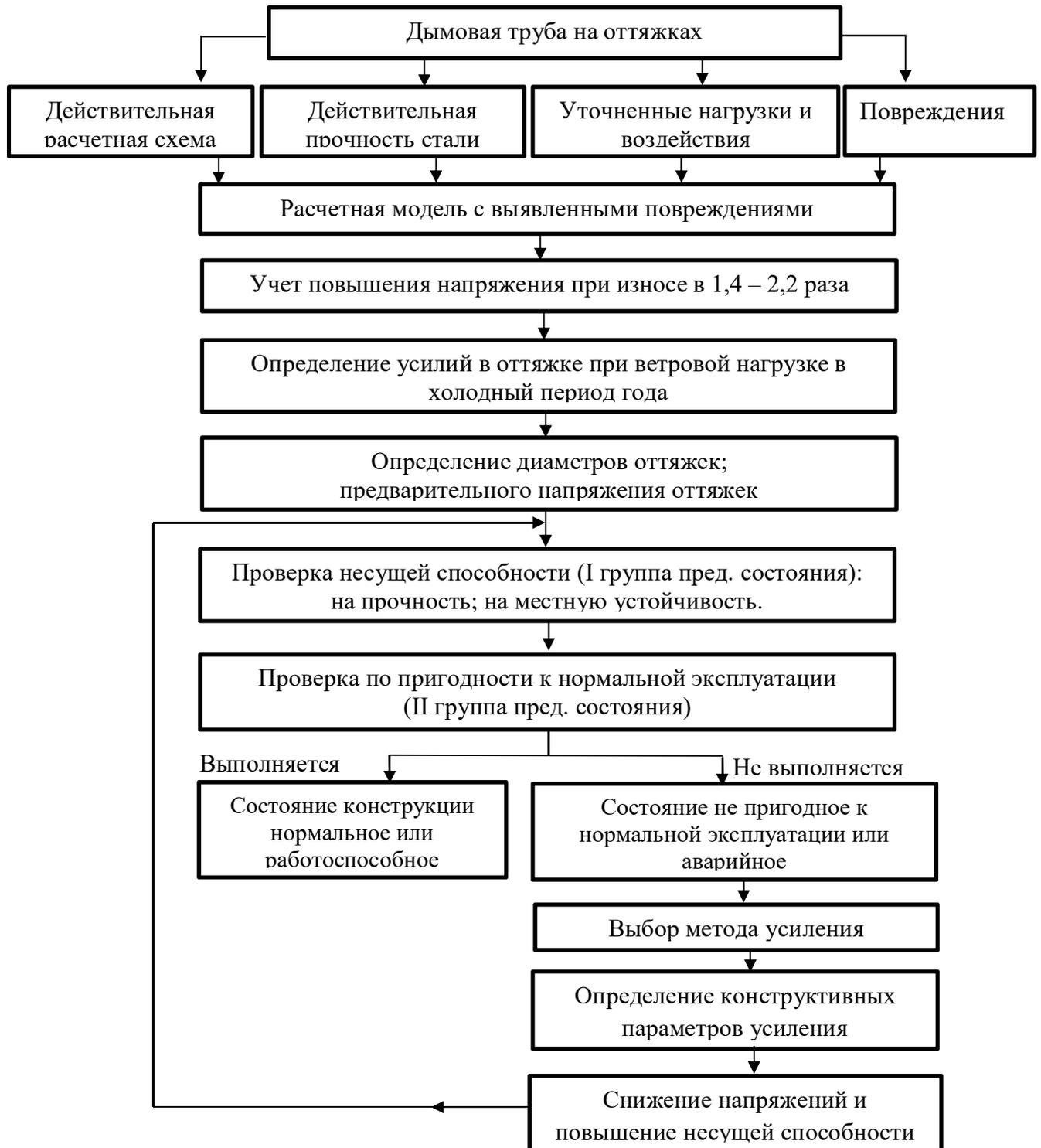


Рисунок 22 – Схема методики оценки несущей способности дымовых труб на оттяжках

Таким образом, методика оценки несущей способности дымовых труб с оттяжками с учетом износа и технического обслуживания является важным инструментом для обеспечения безопасности и надежности данных конструкций. Она позволяет определить состояние и эффективность эксплуатации дымовых труб, а также принять необходимые меры по их обслуживанию и модернизации.

5.4 Выводы по разделу V

1. На основании численных исследований разработаны конструктивные решения по восстановлению дымовых труб, включающие натяжение и замену оттяжек. Данные решения способствуют повышению долговечности дымовых труб с оттяжками и облегчают выполнение технического обслуживания. Определены зависимости для определения диаметра оттяжек ($d=16,6+0,115H$) и предварительного напряжения оттяжек ($\sigma_{01} = -10,882+0,8088H$, $\sigma_{02} = -19,706+1,397H$).

2. Разработана схема усиления лацменных узлов дымовых труб с использованием накладок, которая приводит к значительному снижению кольцевых и меридиональных напряжений в стволе трубы. В результате применения данной схемы, приведенные напряжения в стволе снижаются в 2 раза. При натяжении провисающих оттяжек в лацменном узле возникает увеличение в 2,8 раза приведенных напряжений в кольцевых ребрах. Тем не менее, эти напряжения остаются ниже расчетного сопротивления для листового проката.

3. Результаты исследования по усилению показывают, что изменение толщины накладок от 5 до 10 мм оказывает влияние на напряжения в лацменных узлах дымовых труб. Приведенные напряжения в стволе уменьшаются на 30%, в то время как приведенные напряжения в кольцевых ребрах возрастают до 53%.

4. Разработанная методика, основанная на усилении лацменных узлов, позволяет эффективно оценить состояние и несущую способность таких конструкций. Применение усиления лацменных узлов дымовых труб позволяет значительно снизить приведенные напряжения в стволе трубы, что способствует повышению их долговечности и безопасности эксплуатации. В целом, предложенная методика является полезным инструментом для инженеров и проектировщиков, позволяющим осуществить надежную оценку несущей способности дымовых труб с оттяжками и принять обоснованные решения по их усилению и обслуживанию.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. Основываясь на результатах натурных исследований 32 дымовых труб проведен анализ образования и развития повреждений. Выявлены наиболее значимые повреждения, влияющие на НДС сооружения, которые включают: общий коррозионный износ до 50% сечения, локальный износ лацменного узла до 90%, крен трубы до 1/60 высоты ствола, обрыв оттяжек и ослабление предварительного натяжения. Наиболее ответственными элементами дымовых труб являются лацменный узел и оттяжки.

2. На основании исследования влияния повреждений лацменного узла на несущую способность дымовых труб с оттяжками установлено:

– коррозионный износ до 50% кольцевых ребер лацменного узла приводит к увеличению в них приведенных напряжений в 2 – 2,2 раза для дымовых труб с соотношением d/H от 1/64 до 1/33.

– коррозионный износа стенки в уровне лацменного узла дымовой трубы, а также при совместном провисание оттяжек приводят к увеличению приведенных напряжений в стволе трубы в 1,4 раза. За счет ослабления предварительного натяжения оттяжек, приведенные напряжение в кольцевых ребрах, уменьшаются в 2 раза.

3. Разработанные конструктивные решения по восстановлению, предусматривают натяжение и замену оттяжек в двух уровнях. Это приведет к повышению долговечности дымовых труб с оттяжками и поможет выполнить мероприятия по их техническому обслуживанию. Получены рациональные уровни предварительных натяжений оттяжек. Приведены зависимости для определения диаметра оттяжек ($d=16,6+0,115H$) и предварительного напряжения оттяжек ($\sigma_{01} = -10,882+0,8088H$, $\sigma_{02} = -19,706+1,397H$).

4. Основой предложенного метода технического обслуживания дымовых труб с оттяжками является усиление лацменного узла, позволяющее уменьшить приведенные напряжения в стволе трубы в 2 раза. Однако, при натяжении провисающих оттяжек (13-17 МПа для 1-го уровня, 22-30 МПа для 2-го уровня),

в кольцевых ребрах лацменного узла наблюдается увеличение приведенных напряжений в 2,8 раза.

При усилении лацменного узла выведены зависимости напряжений от толщины листа в стволе ($\sigma = 88,1 - 4,04 \cdot t$) и кольцевом ребре ($\sigma = 33,5 - 2,85 \cdot t$).

5. Разработанная методика определения НДС конструкций дымовых труб в условиях износа, принята для повышения долговечности стальной дымовой трубы на оттяжках $H=20$ м на предприятии ООО «ФИРМА «ПРОМСТРОЙРЕМОНТ», а также внедрена в учебный процесс в ФГБОУ ВО «ДОННАСА» при подготовке специалистов по направлениям подготовки 08.03.01, 08.04.01 «Строительство».

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Авдонин, А. С. Прикладные методы расчета оболочек и тонкостенных конструкций / А. С. Авдонин. – Москва : Машиностроение, 1969. – 405 с. – Текст : непосредственный.
2. Атаманчук, А. В. Исследования воздействия ветрового потока на пакет из трех труб с помощью метода конечных элементов / А. В. Атаманчук, И. С. Холопов. – Текст : непосредственный // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2005. – № 8. – С. 11–16.
3. Атаманчук, А. В. Публичная библиотека в системе непрерывного библиотечно-информационного образования : специальность 05.23.01 «Ветровые нагрузки на элементы трехгранных башен и пакеты вытяжных труб» : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Атаманчук Алексей Вячеславович ; Самарский государственный архитектурно-строительный университет. – Самара, 2005. – 22 с. – Текст : непосредственный.
4. Банах, В. А. Аналіз напружено-деформованого стану попередньо деформованої металевої димової труби заввишки 72 м з урахуванням дефектів / В. А. Банах, А. В. Банах. – Текст : непосредственный // Вісник Донбаської національної академії будівництва і архітектури. – 2009. – Випуск 2009-4(78) Баштові споруди: матеріали, конструкції, технології. – С. 29–33.
5. Белый, Г. И. Пространственное деформирование и несущая способность сжатых стержней стальных ферм, имеющих геометрические несовершенства / Г. И. Белый, П. Б. Стегачев. – Текст : непосредственный // Металлические конструкции и испытания сооружений. – 1982. – Ленинград : ЛИСИ. – С. 66–75.
6. Белый, Г. И. Расчет металлических стержневых элементов, входящих в состав конструкций по пространственно-деформированной схеме / Г. И. Белый. – Текст : непосредственный // Металлические конструкции. – 1983. – Ленинград : ЛИСИ. – С. 42–48.
7. Бердников, Ю. Н. Устойчивость цилиндрической оболочки при поперечной нагрузке типа ветровой / Ю. Н. Бердников, Б. К. Галихманов, В. В. Трибунько. – Текст : непосредственный // Прочность конструкций. – 1978. – No 3. – С. 93–96.
8. Валишвилли, Н. М. Методы расчета оболочек вращения на ЭЦВМ / Н. М. Валишвилли. – Москва : Машиностроение, 1976. – 278 с. – Текст :

непосредственный.

9. Влияние эксцентриситета стыковки царг на НДС оболочек металлических дымовых труб / В. В. Губанов, В. Н. Васылев, А. В. Голиков [и др.]. – Текст : непосредственный // *Металеві конструкції*. – 2013. – Том 19, № 4. – С. 191–202.

10. Вольмир, А. С. Гибкие пластинки и оболочки / А. С. Вольмир. – Москва : Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1956. – 420 с. – Текст : непосредственный.

11. Вольмир, А. С. Устойчивость деформируемых систем / А. С. Вольмир ; 2-е издание дополненное и переработанное. – Москва : Наука, 1967. – 984 с. – Текст : непосредственный.

12. Голиков, О. В. Вдосконалення методів розрахунку вузлів металевих димарів на міцність : спеціальність 05.23.01 «Строительные конструкции, здания и сооружения» : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Голиков Олександр Володимирович ; Донбаська національна академія будівництва і архітектури. – Макіївка, 2012. – 22 с. – Текст : непосредственный.

13. Городецкий, А. С. Информационные технологии расчета и проектирования строительных конструкций : учебное пособие / А. С. Городецкий, В. С. Шмуклер, А. В. Бондарев. – Харьков : НТУ «ХПИ», 2003. – 889 с. – Текст : непосредственный.

14. Горохов, Е. В. Диагностика, выявление резервов несущей способности и усиление металлоконструкций промзданий при реконструкции : учебное пособие / Е. В. Горохов ; Красноярский инженерно-строительный институт. – Киев : КИСИ, 1987. – 83 с. – Текст : непосредственный.

15. Горохов, Е. В. Повышение долговечности и надежности металлических конструкций промышленных зданий и сооружений в условиях эксплуатации и реконструкции : специальность 05.23.01 «Строительные конструкции, здания и сооружения» : автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук / Горохов Евгений Васильевич ; Днепропетровский инженерно-строительный институт. – Днепропетровск, 1992. – 92 с. – Текст : непосредственный.

16. ГОСТ 8713-79. Сварка под флюсом. Соединения сварные. Основные типы, конструктивные элементы и размеры = Flux welding. Welded joints. Main types design elements and dimensions : межгосударственный стандарт

: издание официальное : утвержден и введен в действие Постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 26.12.79 N 5047 : взамен ГОСТ 8713-70 : дата введения 1981-01-01 / разработан Государственным комитетом СССР по стандартам, Академией наук УССР. – Москва : Стандартиформ, 1977. – 42 с. – Текст : непосредственный.

17. ГОСТ 11533-75. Автоматическая и полуавтоматическая дуговая сварка под флюсом. Соединения сварные под острыми и тупыми углами = Automatic and semiautomatic submerged arc welding. Acute and blunt weld joints. Main types, design elements and dimensions : государственный стандарт Союза ССР : издание официальное : утвержден и введен в действие постановлением Государственного комитета стандартов Совета Министров СССР от 12 декабря 1975 г. N 3880 : взамен ГОСТ 11533-65 : дата введения 1977-01-01. – Москва : Издательство стандартов, 1977. – 39 с. – Текст : непосредственный.

18. ГОСТ 11534-75. Ручная дуговая сварка. Соединения сварные под острыми и тупыми углами = Hand arc welding. Acute and blunt weld joints. Main types, design elements and dimensions : издание официальное : утвержден Постановлением Государственного комитета стандартов Совета Министров СССР от 12 декабря 1975 г. № 3881 : взамен ГОСТ 11534-65 : дата введения 1977-01-01. – Москва : ИПК Издательство стандартов, 1976. – 23 с. – Текст : непосредственный.

19. ГОСТ 23518-79. Дуговая сварка в защитных газах. Соединения сварные под острыми и тупыми углами = Gas-shielded arc welding. Welded joints : межгосударственный стандарт : издание официальное : утвержден Постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 11.03.79 № 870 : переиздание февраль 2011 : дата введения 1980-01-01. – Москва : Издательство стандартов, 1979 ; Стандартиформ, 2011. – 27 с. – Текст : непосредственный.

20. ГОСТ 31937-2011. Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния = Buildings and constructions. Rules of inspection and monitoring of the technical condition : введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 27 декабря 2012 г. № 1984 т : введен впервые : дата введения 2014-01-01 / разработан Государственным унитарным предприятием г. Москвы «Московский научно-исследовательский и проектный институт типологии, экспериментального проектирования». – Москва : Стандартиформ, 2014. – 89

с. – Текст : непосредственный.

21. ГОСТ Р 52857.11-2007. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчёта на прочность. Методы расчёта на прочность обечаек днищ с учётом смещения кромок сварных соединений, угловатости и некруглости обечаек = Vessels and apparatus. Norms and methods of strength calculation. Method of strength calculation of shells and heads according to weld misalignment, angular misalignment and shell nonroundness : Национальный стандарт Российской Федерации : издание официальное : утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 27 декабря 2007 г. N 503-ст : введен впервые : дата введения 2008-04-01 / разработан ОАО НИИХИММАШ; ЗАО Петрохим Инжиниринг; ОАО ВНИИНЕФТЕМАШ; Ростехнадзор. – Москва : Стандартинформ, 2009. – 15 с. – Текст : непосредственный.

22. Григолюк, Э. И. О пространственном подходе к численному решению задач механики тонкостенных конструкций / Э. И. Григолюк, П. Я. Носатенко. – Текст : непосредственный // Журнал вычислительной математики и математической физики. – 1989. – Том 29, № 1. – С. 151–153.

23. Григолюк, Э. И. Устойчивость оболочек / Э. И. Григолюк, В. В. Кабанов. – Москва : Наука, 1978. – 365 с. – Текст : непосредственный.

24. Грицков, П. М. Ремонт промышленных дымовых труб / П. М. Грицков, Д. И. Вишневецкий, А. А. Зимберман. – Москва : Стройиздат, 1979. – 174 с. – Текст : непосредственный.

25. Губанов, В. В. Анализ влияния конструктивных характеристик оттяжек на усилие в дымовой трубе / В. В. Губанов, Е. Н. Оленич, А. В. Оленич. – Текст : непосредственный // Научно-технические достижения студентов строительной-архитектурной отрасли : сборник тезисов докладов по материалам конференции, 19 апреля 2019 г., Макеевка. – Макеевка : ДОННАСА, 2019. – С. 149–150.

26. Губанов, В. В. Анализ методов проверочных расчетов металлических дымовых труб и газоотводящих стволов / В. В. Губанов, А. В. Голиков. – Текст : непосредственный // Вісник Донбаської національної академії будівництва і архітектури. – 2005. – Випуск 2005-8(56). – С. 153–155.

27. Губанов, В. В. Влияние количества оттяжек на напряженно-деформированное состояние стальных дымовых труб / В. В. Губанов, Е. Н. Оленич. – Текст : электронный // Металлические конструкции. – 2020. –

Том 26, № 3. – С. 131–142. – URL: http://donnasa.ru/publish_house/journals/m-k/2020-3/03_gubanov_olenich.pdf (дата публикации: 12.10.2020).

28. Губанов, В. В. Влияние конструктивных параметров на напряженно-деформированное состояние дымовой трубы с двумя уровнями оттяжек / В. В. Губанов, Е. Н. Оленич, А. В. Оленич. – Текст : электронный // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. – 2019. – Выпуск 2019-4(138) Научно-технические достижения студентов строительной-архитектурной отрасли. – С. 57–63. – URL: [http://donnasa.ru/publish_house/journals/vestnik/2019/vestnik_2019-4\(138\).pdf](http://donnasa.ru/publish_house/journals/vestnik/2019/vestnik_2019-4(138).pdf) (дата публикации: 28.06.2019).

29. Губанов, В. В. Вопросы разработки методики натуральных исследований при диагностике металлических конструкций / В. В. Губанов. – Текст : непосредственный // Строительство. Материаловедение. Машиностроение : сборник научных трудов. – 2002. – № 18. – С. 55–58.

30. Губанов, В. В. Выбор расчётной схемы для численного анализа свободностоящих дымовых труб / В. В. Губанов, А. Н. Кульчицкий. – Текст : непосредственный // Металеві конструкції. – 2012. – Том 18, № 3. – С. 197–208.

31. Губанов, В. В. Забезпечення заданої довговічності металевих промислових висотних споруд : спеціальність 05.23.01 «Строительные конструкции, здания и сооружения» : автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук / Губанов Вадим Вікторович ; Донбаська національна академія будівництва і архітектури. – Макіївка, 2013. – 39 с. – Текст : непосредственный.

32. Губанов, В. В. Методика определения краевых напряжений в оболочках дымовых труб / В. В. Губанов, А. В. Голиков. – Текст : непосредственный // Збірник наукових праць Українського науково-дослідного та проектного інституту сталевих конструкцій імені В. М. Шимановського. – 2008. – Випуск 2. – С. 65–68.

33. Губанов, В. В. Напряженно-деформированное состояние лацменного узла дымовых труб с четырьмя оттяжками в условиях эксплуатации / В. В. Губанов, Е. Н. Оленич, А. В. Оленич. – Текст : непосредственный // Актуальные проблемы и перспективы развития строительного комплекса : сборник статей международной научно-практической конференции, 3–4 декабря 2019 г., Волгоград / Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Волгоградский государственный технический

университет, Институт архитектуры и строительства. – Волгоград : ВолгГТУ, 2019. – С. 51–57.

34. Губанов, В. В. Обоснование экспериментальных исследований влияния локальной вогнутости на НДС оболочек металлических дымовых труб / В. В. Губанов, А. Н. Кульчицкий, А. В. Голиков. – Текст : непосредственный // *Металеві конструкції*. – 2013. – Том 19, № 3. – С. 163–172.

35. Губанов, В. В. Особенности износа стальных дымовых труб на оттяжках труб / В. В. Губанов, Е. Н. Оленич. – Текст : электронный // *Металлические конструкции* – 2022. – Том 28, № 4. – С. 167–181. – URL: http://donnasa.ru/publish_house/journals/mk/2022-4/st_01_gubanov_olenich.pdf (дата публикации: 15.02.2023).

36. Губанов, В. В. Особенности и характеристики повреждаемости дымовых труб на оттяжках / В. В. Губанов, И. В. Межинская, А. В. Голиков. – Текст : непосредственный // *Вісник Донбаської національної академії будівництва і архітектури*. – 2007. – Выпуск 2007-6(68). – С. 8–12.

37. Губанов, В. В. Особенности проектирования дымовых труб с жесткими подкосами / В. В. Губанов, А. В. Голиков. – Текст : непосредственный // *Металеві конструкції*. – 2011. – Том 17, № 2. – С. 115–122.

38. Губанов, В. В. Особенности работы узлов тонкостенных цилиндрических оболочек высотных сооружений / В. В. Губанов, А. В. Голиков. – Текст : непосредственный // *Научно-техническое творчество молодежи – путь к обществу, основанному на знаниях : сборник научных докладов*. – Москва : МГСУ, 2011. – С. 31–33.

39. Губанов, В. В. Особенности расчёта локального усиления дымовых труб / В. В. Губанов, А. Н. Кульчицкий. – Текст : непосредственный // *Сучасне промислове та цивільне будівництво*. – 2011. – Том 7, № 3. – С. 184–191.

40. Губанов, В. В. Расчет и конструирование газоотводящих стволов с местными напряжениями / В. В. Губанов, А. В. Голиков. – Текст : непосредственный // *Вісник Донбаської національної академії будівництва і архітектури*. – 2009. – Выпуск 2009-4(78) Баштові споруди: матеріали, конструкції, технології. – С. 215–220.

41. Губанов, В. В. Совершенствование методов расчета и диагностики металлических мачт сотовой связи / В. В. Губанов, И. В. Межинская. – Текст : непосредственный // *Збірник наукових праць українського науково-дослідного*

- та проектного інституту сталевих конструкцій імені В. М. Шимановського. – 2012. – Випуск 9. – С. 177–192.
42. Губанов, В. В. Усиление лацменных узлов дымовых труб / В. В. Губанов, С. Н. Мишура, Е. Н. Оленич. – Текст : электронный // Металлические конструкции. – 2022. – Том 28, № 1. – С. 19–31. – URL: http://donnasa.ru/publish_house/journals/mk/2022-1/02_gubanov_mishura_olenich.pdf (дата публикации: 11.04.2022).
43. Губанов, В. В. Уточнение методик расчета локальных напряжений в оболочках дымовых труб и газоотводящих стволов / В. В. Губанов, А. В. Голиков. – Текст : непосредственный // Будівельні металеві конструкції: сьогодення та перспективи розвитку. БМК-2006 : доповіді V Міжнародної науково-технічної конференції, 19–22 вересня 2006 р. м. Київ, Україна. – Київ : Сталь, 2006. – С. 118–121.
44. Губанов, В. В. Эксплуатация и ремонт дымовых труб и газоотводящих стволов / В. В. Губанов, В. И. Москаленко, А. В. Голиков. – Текст : непосредственный // Будівельні металеві конструкції: сьогодення та перспективи розвитку. БМК-2006 : доповіді V Міжнародної науково-технічної конференції, 19–22 вересня 2006 р., м. Київ, Україна. – Київ : Сталь, 2006. – С. 194–196.
45. Гудрамович, В. С. Устойчивость ослабленных круговыми отверстиями гладких цилиндрических оболочек при действии поперечного изгиба / В. С. Гудрамович, П. А. Дзюба, Е. Ф. Прокопало. – Текст : непосредственный // Теоретическая и прикладная механика. – 2007. – Выпуск 43. – С. 82–87.
46. Гудрамович, В. С. Устойчивость упруго-пластических оболочек: монография / В. С. Гудрамович. – Киев : Наукова думка, 1987. – 216 с. – Текст : непосредственный.
47. Даревский, В. М. К теории цилиндрических оболочек / В. М. Даревский. – Текст : непосредственный // Прикладная математика и механика. – 1951. – Том 15, выпуск 5. – С. 531–562.
48. Даревский, В. М. Основы теории оболочек / В. М. Даревский. – Текст : непосредственный // Труды Центрального научно-исследовательского института авиационного моторостроения. – 1998. – Выпуск 1309. – С. 3–193.
49. ДБН 362-92. Оцінка технічного стану сталевих будівельних конструкцій, що експлуатуються : видання офіційне : затверджено та введено в

дію Наказом Держбуду України від 15 березня 1992 р. № 32 : введено вперше : надано чинності 1992-07-01 / розроблено Інститутом УкрНДІпроектстальконструкція. – Київ : Держбуд України, 1995. – 80 с. – Текст : непосредственный.

50. ДБН В.1.2-2:2006. Нагрузки и воздействия : издание официальное : приняты приказом Минстроя Украины от 3 июля 2006 г. № 220 : введены впервые : дата введения 2007-01-01 / разработчик ОАО УкрНИИпроектстальконструкція им. В. Н. Шимановского. – Киев : Минстрой Украины, 2006. – 78 с. – (Система обеспечения надежности и безопасности строительных объектов). – Текст : непосредственный.

51. ДБН В.1.2-14-2009. Общие принципы обеспечения надежности и конструктивной безопасности зданий, сооружений, строительных конструкций и оснований : издание официальное : утвержден и введен в действие Приказом Минрегионстроя Украины от 30 декабря 2008 г. № 709 : введен впервые : дата введения 2009-06-22 / разработчик ОАО «Украинский научно-исследовательский и проектный институт стальных конструкций им. В. М. Шимановского». – Киев : Минрегионстрой Украины, 2009. – 43 с. – Текст : непосредственный.

52. ДБН В.2.6-163:2010. Конструкції будівель і споруд. Сталеві конструкції. Норми проектування, виготовлення і монтажу : видання офіційне : на заміну СНиП II-23-81* окрім розділів 15*–19, СНиП III-18-75 окрім розділів 3–8, СНиП 3.03.01-87 у частині, що стосується сталевих конструкцій окрім п. п. 4.78–4.134 ; надано чинності 2011-12-01 / розроблено ВАТ УкрНДІпроектстальконструкція ім. В. М. Шимановського. – Київ : Мінрегіонбуд України, 2011. – 127 с. – Текст : непосредственный.

53. ДБН В.3.1-218-174-2002. Мости та труби. Оцінка технічного стану автодорожніх мостів, що експлуатуються : видання офіційне : надано чинності 2003-01-01 / розробник Державне агентство автомобільних доріг України (УкрАвтоДор). – Київ : Мінрегіонбуд України, 2002. – 67 с. – Текст : непосредственный.

54. Динамический расчёт сооружений на специальные воздействия / [М. Ф. Барштейн, Н. М. Бородачев, Л. Х. Блюмина и др.] ; под ред. Б. Г. Коренева, И. М. Рабиновича. – Москва : Стройиздат, 1981. – 215 с. – Текст : непосредственный.

55. Дужих, Ф. П. Промышленные дымовые и вентиляционные трубы :

- справочное издание / Ф. П. Дужих, В. П. Осоловский, М. Г. Ладыгичев. – Москва : Теплотехник, 2004. – 464 с. – Текст : непосредственный.
56. Дымовые трубы / А. М. Ельшин, М. Н. Ижорин, В. С. Жолудов, Е. Г. Овчаренко. – Москва : Стройиздат, 2001. – 296 с. – Текст : непосредственный.
57. Жигалко, Ю. П. Применение ЭЦВМ к исследованию напряженно-деформированного состояния упругих цилиндрических оболочек, подверженных действию сосредоточенных нагрузок / Ю. П. Жигалко, Л. А. Сайтбекова. – Текст : непосредственный // Исследования по теории пластин и оболочек. – 1967. – Выпуск 5. – С. 93–112.
58. Казакевич, М. И. Актуальные проблемы динамики сооружений / М. И. Казакевич, В. В. Кулябко. – Текст : непосредственный // Металлические конструкции. – 1998. – Том 1, № 1. – С. 65–75.
59. Качурин, В. К. Теория висячих систем / В. К. Качурин. – Москва : Госстройиздат, 1962. – 224 с. – Текст : непосредственный.
60. Кінаш, Р. І. Визначення коефіцієнта аеродинамічного опору колових циліндрів / Р. І. Кінаш, О. Є. Копилов. – Текст : непосредственный // Металлические конструкции: взгляд в прошлое и будущее : сборник докладов VIII Украинской научно-технической конференции. – Киев : Сталь, 2004. – Часть 2. – С. 401–406.
61. Кінаш, Р. І. Методи гасіння коливань димарів викликаних відриванням вихорів типу Бенарда-Кармана / Р. І. Кінаш, О. Є. Копилов. – Текст : непосредственный // Вісник Донбаської державної академії будівництва і архітектури: – 2003. – Том 2, випуск 2003-2(39). – С. 39–45.
62. Коноплёв, Ю. Г. Экспериментальное исследование задачи о действии сосредоточенной силы на цилиндрическую оболочку / Ю. Г. Коноплёв. – Текст : непосредственный // Исследования по теории пластин и оболочек. – 1966. – Выпуск 4. – С. 83–90.
63. Корнеев, Б. Г. Опыт гашения колебаний башенного сооружения / Б. Г. Корнеев, А. И. Блехерман. – Текст : непосредственный // Строительная механика и расчет сооружений. – 1979. – № 1. – С. 50–51.
64. Королев, В. П. Методика риск-анализа показателей долговечности металлоконструкций при выборе мер первичной и вторичной защиты от коррозии / В. П. Королев, А. А. Мацегора, И. В. Кущенко. – Текст : непосредственный // Збірник наукових праць Українського науково-дослідницького та проектного інституту сталевих конструкцій ім.

В. М. Шимановського. – 2012. – Випуск 9. – С. 232–244.

65. Королев, В. П. Оценка остаточного ресурса цилиндрических листовых конструкций башенного типа при коррозионно-механическом разрушении / В. П. Королев, И. А. Волкова, М. А. Яременко. – Текст : непосредственный // Вісник Донбаської державної академії будівництва і архітектури. – 2001. – Випуск 2001-5(30) Будівельні конструкції, будівлі та споруди. – С. 163–167.

66. Корчак, М. Д. Влияние геометрических несовершенств на несущую способность легких металлических конструкций : специальность 05.23.01 «Строительные конструкции, здания и сооружения» : автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук / Корчак Михаил Дмитриевич. – Москва, 1993. – 39 с. – Текст : непосредственный.

67. Кулябко, В. В. Динамика стальной башни (трубы высотой 150 м) с динамическими гасителями колебаний / В. В. Кулябко, Л. П. Телипко. – Текст : непосредственный // Вісник Донбаської державної академії будівництва і архітектури. – 2001. – Випуск 2001-5(30). – С. 54–57.

68. Кулябко В. В. Концептуальные направления расчета и конструирования демпфирующих устройств и схем высотных сооружений / В. В. Кулябко. – Текст : непосредственный // Вісник Донбаської національної академії будівництва і архітектури. – 2005. – Випуск 2005-8(56). – С. 112–119.

69. Лантух-Лященко, А. І. Модель деградації елементів транспортних споруд / А. І. Лантух-Лященко. – Текст : непосредственный // Захист від корозії і моніторинг залишкового ресурсу промислових будівель, споруд та інженерних мереж. – 2003. – Донецьк : УАМК. – С. 114–119.

70. Лессиг, Е. Н. Листовые металлические конструкции / Е. Н. Лессиг, А. Ф. Лилеев, А. Г. Соколов. – Москва : Стройиздат, 1970. – 420 с. – Текст : непосредственный.

71. Лизин, В. Т. Проектирование тонкостенных конструкций : учебное пособие для студентов вузов / В. Т. Лизин, В. А. Пяткин ; [3-е изд., перераб. и доп.]. – Москва : Машиностроение, 1994. – 384 с. – Текст : непосредственный.

72. Махинько, А. В. Предложение по нормированию динамических ветровых нагрузок на решетчатые опоры в ДБН В.1.2–2:2006 / А. В. Махинько. – Текст : непосредственный // Вісник Донбаської національної академії будівництва і архітектури. – 2009. – Випуск 2009-4(78) Баштові споруди: матеріали, конструкції, технології. – С. 22–28.

73. Мельников, Н. П. Металлические конструкции: Современные состояния и перспективы развития / Н. П. Мельников. – Москва : Стройиздат, 1983. – 543 с. – Текст : непосредственный.

74. Меркин, Д. Р. Введение в механику гибкой нити / Д. Р. Меркин. – Москва : Наука, 1980. – 240 с. – Текст : непосредственный.

75. Металлические конструкции. В 3 томах. Том 3. Специальные конструкции и сооружения : учебник для строительных вузов / [под редакцией В. В. Горева] ; [2-е издание, исправленное]. – Москва : Высшая школа, 2002. – 544 с. – Текст : непосредственный.

76. Металлические конструкции / [Н. С. Стрелецкий, А. Н. Гениев, Е. И. Беленя и др. ; под общей редакцией Н. С. Стрелецкого] ; [издание третье, переработанное]. – Москва : Государственное издательство литературы по строительству, архитектуре и строительным материалам, 1961. – 776 с. – Текст : непосредственный.

77. Металлические конструкции (техническая эксплуатация) / М. М. Сахновский, Г. В. Жемчужников, Ю. Б. Динельт, Ю. Б. Зданевич ; под общей редакцией М. М. Сахновского. – Киев : Будівельник, 1978. – 256 с. – Текст : непосредственный.

78. Методика расчёта нагрузок, прочности и ресурса стволов дымовых и вентиляционных промышленных труб / В. Г. Сатьянов, Н. А. Хапонен, П. Б. Пилипенко [и др.]. – Москва : Универсум, 2005. – 264 с. – Текст : непосредственный.

79. Моссаковский, В. И. Моделирование несущей способности цилиндрических оболочек / В. И. Моссаковский, Л. И. Маневич, А. М. Мильцин. – Киев : Наука, 1977. – 140 с. – Текст : непосредственный.

80. Научные основы обеспечения надежности и экономичности шахтных копров : монография / В. Н. Кущенко, В. М. Левин, В. Ф. Муцанов [и др.]. – Макеевка : ДонНАСА, 2012. – 462 с. – Текст : непосредственный.

81. Никитин, П. Н. Опыт проектирования дымовых труб / П. Н. Никитин, Г. В. Оносов. – Текст : непосредственный // Промышленное и гражданское строительство. – 2009. – № 5. – С. 24–27.

82. Никулин, Н. В. Экспериментальное исследование прочности цилиндрических оболочек при действии локальных нагрузок / М. В. Никулин. – Текст : непосредственный // Прочность и динамика авиационных двигателей : научные труды. – 1966. – Выпуск 3. – С. 3–32.

83. Новожилов, В. В. Краткий очерк развития теории оболочек в СССР / В. В. Новожилов. – Текст : непосредственный // Исследования по теории пластин и оболочек. – 1970. – Выпуск VI–VII. – С. 3–23.
84. Новожилов, В. В. Теория тонких оболочек / В. В. Новожилов. – Ленинград : Судпромгиз, 1962. – 432 с. – Текст : непосредственный.
85. Обеспечение безаварийной работы конструкций зданий и сооружений в Донецкой области методами технической диагностики и паспортизации / Е. В. Горохов, В. П. Королев, В. Л. Мотовилин [и др.]. – Текст : непосредственный // Аварії на будівлях і спорудах та їх попередження : збірник праць другої Української науково-технічної конференції, 8–9 грудня 1999 р., Київ. – Київ : [б. и.], 1999. – С. 135–143.
86. Образцов, И. Ф. Метод конечных элементов в задачах строительной механики летательных аппаратов : учебное пособие / И. Ф. Образцов, Л. М. Савельева, Х. С. Хазанов. – Москва : Высш. школа, 1985. – 392 с. – Текст : непосредственный.
87. Оценка безопасности эксплуатируемых сооружений на основе понятия третьего предельного состояния / Е. В. Горохов, В. Ф. Мушанов, А. М. Югов [и др.]. – Текст : непосредственный // Металеві конструкції. – 2003. – Том 6, № 1. – С. 97–101.
88. Перельмутер, А. В. Избранные проблемы надежности и безопасности строительных конструкций : монография / А. В. Перельмутер. – Москва : Издательство Ассоциации строительных вузов, 2007. – 256 с. – Текст : непосредственный.
89. Перельмутер, А. В. О статистике аварий стальных конструкций / А. В. Перельмутер. – Текст : непосредственный // Будівельні конструкції: Аварії на будівлях і спорудах та їх попередження : збірник наукових праць. – Київ : НДІБК, 1999. – С. 14–19.
90. Перельмутер, А. В. Проблемы оценки надежности эксплуатируемых металлоконструкций в связи с реконструкцией зданий и сооружений / А. В. Перельмутер. – Текст : непосредственный // Республиканский Межведомственный сборник научных трудов. – 1988. – Выпуск 14. – С. 52–59.
91. Перельмутер, А. В. Расчётные модели сооружений и возможность их анализа / А. В. Перельмутер, В. И. Сливкер. – Киев : Сталь, 2002. – 615 с. – Текст : непосредственный.

92. Перельмутер, А. В. Управление поведением несущих конструкций / А. В. Перельмутер. – Киев : УФИМБ, 1998. – 148 с. – Текст : непосредственный.
93. Пичугин, С. Ф. Актуальные задачи исследований надежности металлических конструкций / С. Ф. Пичугин. – Текст : непосредственный // Металлические конструкции : труды VI-й Украинской научно-технической конференции. – Киев-Николаев, 1996 – С. 11–12.
94. Пичугин, С. Ф. Ветровая нагрузка на строительные конструкции / С. Ф. Пичугин, А. В. Махинько. – Полтава : АСМІ, 2005. – 342 с. – Текст : непосредственный.
95. Пичугин, С. Ф. Нормирование ветровой нагрузки на решётчатые опоры в стандартах разных стран мира / С. Ф. Пичугин, А. В. Махинько. – Текст : непосредственный // Металеві конструкції. – 2009. – Том 15, № 4. – С. 237–252.
96. Пичугин, С. Ф. О принципах нормирования ветровых нагрузок в Eurocode 1 «Action on structures» и СНиП 2.01.07-85 «Нагрузки и воздействия» / С. Ф. Пичугин, А. В. Махинько. – Текст : непосредственный // Современные строительные конструкции из металла и древесины : [сборник научных трудов]. – Одесса : ОГАСА, 2007. – Часть 1. – С. 152–164.
97. Повышение долговечности металлических конструкций промышленных зданий / [А. И. Кикин, А. А. Васильев, Б. Н. Кошутин и др.] ; под редакцией А. И. Кикина. – [2-е издание, переработанное и дополненное]. – Москва : Стройиздат, 1984. – 301 с. – Текст : непосредственный.
98. Ребров, И. С. Усиление стержневых металлических конструкций: проектирование и расчет / И. С. Ребров. – Ленинград : Стройиздат, 1988. – 288 с. – Текст : непосредственный.
99. Ройтман, А. Г. Надежность конструкций эксплуатируемых зданий / А. Г. Ройтман. – Москва : Стройиздат, 1985. – 175 с. – Текст : непосредственный.
100. Савицкий, Г. А. Ветровая нагрузка на сооружения / Г. А. Савицкий. – Москва : Изд-во лит. по стр-ву, 1972. – 111 с. – Текст : непосредственный.
101. Савицкий, Г. А. Основы расчета радиомачт: статика и динамика / Г. А. Савицкий. – Москва : Государственное издательство литературы по вопросам радио и связи, 1953. – 111 с. – Текст : непосредственный.
102. Саченков, А. В. Влияние начальных неправильностей на устойчивость тонких оболочек / А. В. Саченков, В. Г. Выборнов. – Текст :

- непосредственный // Исследования по теории пластин и оболочек. – 1965. – Выпуск 3. – С. 24–34.
103. Саченков, А. В. Теоретико-экспериментальный метод исследования устойчивости пластин и оболочек / А. В. Саченков. – Текст : непосредственный // Исследования по теории пластин и оболочек. – 1968. – С. 391–433.
104. Семко, О. В. До оцінки нормативної надійності баштових опор з позицій оптимізаційних критеріїв теорії ризиків / О. В. Семко, Н. О. Махінько. – Текст : непосредственный // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди : збірник наукових праць. – 2009. – Випуск 18. – С. 414–423.
105. Симмиу, Э. Воздействие ветра на здания и сооружения / Э. Симиу, Р. Сканлан ; [пер. с англ. Б. Е. Маслова, А. В. Швецово́й]. – Москва : Стройиздат, 1984. – 308 с. – Текст : непосредственный.
106. Система мониторинга напряженно-деформированного состояния металлоконструкций / Е. В. Горохов, А. М. Югов, Ю. П. Некрасов, Е. В. Денисов. – Текст : непосредственный // Современные методы и средства неразрушающего контроля и технической диагностики : материалы 9 ежегодного международного семинара – выставки, 10–14 сентября 2001 г., Ялта. – Киев : УИЦ «Наука. Техника. Технология», 2001. – С. 34.
107. Система моніторингу технічного стану будівельних металевих конструкцій / Є. В. Горохов, А. М. Югов, Ю. П. Некрасов, Е. М. Житенко. – Текст : непосредственный // Современные строительные конструкции из металла и древесины : сборник научных трудов ОГАСА. – 1999. – Одесса : Город мастеров. – С. 14–19.
108. СНиП 2.03.11-85 Защита строительных конструкций от коррозии : издание официальное : утверждены Постановлением Государственного комитета СССР по делам строительства от 30 августа 1985 г. N 137 : взамен СНиП II-28-73*, СН 65-76 : дата введения 1986-01-01 / разработаны НИИЖБ Госстроя СССР, ЦНИИпроектсталь-конструкция им. Мельникова Госстроя СССР, ЦНИИСК им. Кучеренко Госстроя СССР [и др.]. – Москва : Стройиздат, 1986. – 46 с. – Текст : непосредственный.
109. СНиП 2.09.03-85. Сооружения промышленных предприятий : издание официальное : утверждены постановлением Государственного комитета СССР по делам строительства от 29 декабря 1985 г. N 263 : взамен СНиП II-91-77, СН 302-65, СН 471-75 : дата введения 1987-01-01 / разработаны ЦНИИпромзданий Госстроя СССР, Харьковский Промстройниипроект,

Ленинградский Промстройпроект [и др.]. – Москва : ЦИТП Госстроя СССР, 1986. – 56 с. – Текст : непосредственный.

110. СНиП 3.03.01-87. Несущие и ограждающие конструкции : издание официальное : утверждены постановлением Государственного строительного комитета СССР от 4 декабря 1987 г. № 280 : взамен СНиП III-15-76; СН 383-67; СНиП III-16-80; СН 420-71; СНиП III-18-75; СНиП III-17-78; СНиП III-19-76; СН 393-78 : дата введения 1988-01-01 / разработаны ЦНИИОМТП Госстроя СССР, НИИЖБ Госстроя СССР, ВНИПИПромстальконструкцией Минмонтажспецстроя СССР [и др.]. – Москва : ГУП ЦПП, 1989. – 123 с. – Текст : непосредственный.

111. СНиП II-23-81*. Часть II. Нормы проектирования. Глава 23 Стальные конструкции : утверждены постановлением Госстроя СССР от 14 августа 1981 г. № 144 : взамен СНиП II-В.3-72; СНиП II-И.9-62; СН 376-67 : дата введения 1982-01-01 / разработчики ЦНИИСК им. Кучеренко с участием ЦНИИпроектстальконструкции Госстроя СССР, МИСИ им. В. В. Куйбышева Минвуза СССР [и др.]. – Москва : Центральный институт типового проектирования, 1991. – 96 с. – Текст : непосредственный.

112. СНиП III-18-75. Правила производства и приёмки работ. Глава 18 Металлические конструкции : издание официальное : утверждены и введены в действие постановлением Государственного комитета Совета Министров СССР по делам строительства от 20 октября 1975 г. № 181 : взамен СНиП III-В.5-62* главы Металлические конструкции : дата введения 1977-01-01 / разработчик Минмонтажспецстрой СССР. – Москва : Госстрой СССР, 1976. – 101 с. – Текст : непосредственный.

113. Соколов, А. Г. Опоры линий передач (расчет и конструирование) / А. Г. Соколов. – Москва : Государственное издательство литературы по строительству, архитектуре и строительным материалам, 1961. – 171 с. – Текст : непосредственный.

114. Солодарь, М. Б. Металлические конструкции вытяжных башен / М. Б. Солодарь, М. В. Кузнецова, Ю. С. Плишкин. – Ленинград : Стройиздат, Ленинградское отделение, 1975. – 179 с. – Текст : непосредственный.

115. СП 20.13330.2016. Свод правил. Нагрузки и воздействия = Loads and actions : утвержден приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации (Минстрой России) от 3 декабря 2016 г. № 891/пр и введен в действие с 4 июня 2017 г. : взамен СП

20.13330.2011 «СНиП 2.01.07-85» : дата введения 2017-06-04 / исполнитель ЦНИИСК им. В. А. Кучеренко АО «НИЦ "Строительство"» при участии ФГБУ «Главная геофизическая обсерватория им. А. И. Воейкова». – Москва : ЦНИИСК им. В. А. Кучеренко АО Минстроя России, 2016. – 110 с. – Текст : непосредственный.

116. СП 43.13330.2012. Свод правил. Сооружения промышленных предприятий : издание официальное : утвержден и введен в действие приказом Министерства регионального развития Российской Федерации (Минрегион России) от 29 декабря 2011 г. No 620 и введен в действие с 01 января 2013 г. : актуализированная редакция СНиП 2.09.03-85 : дата введения 2013-01-01 / исполнитель ЦНИИПромзданий. – Москва : Министерство регионального развития Российской Федерации, 2012. – 102 с. – Текст : непосредственный.

117. СП 375.1325800.2017. Свод правил. Трубы промышленные дымовые. Правила проектирования = Industrial chimneys. Design rules : издание официальное : утвержден Приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации (Минстрой России) от 14 декабря 2017 г. No 1667/пр и введен в действие с 15 июня 2018 г. : введен впервые : дата введения 2018-06-15 / исполнитель Ассоциация пече-трубостроителей и пече-трубопроизводителей России. – Москва : Министерство строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации. – Москва : Минстрой России, 2017. – 91 с. – Текст : непосредственный.

118. Справочник проектировщика. Металлические конструкции промышленных зданий и сооружений / под ред. Н. П. Мельникова. – Москва : Госстройиздат, 1962. – 590 с. – Текст : непосредственный.

119. Стандарт саморегулирующей организации. СТО СРО ЭТМП 0316. Методика обследования технического состояния промышленных дымовых и вентиляционных труб / Х. М. Ханухов, И. И. Симонов, С. Н. Яровой [и др.]. – Москва : [б. и.], 2016. – 68 с. – Текст : непосредственный.

120. Стрелецкий, Н. С. К вопросу развития методики расчета по предельным состояниям / Н. С. Стрелецкий. – Москва : МИСИ, 1971. – 58 с. – Текст : непосредственный.

121. Стрелецкий, Н. С. Курс металлических конструкций специальных сооружений. Часть III / Н. С. Стрелецкий. – Москва : Государственное издательство строительной литературы, 1944. – 496 с. – Текст : непосредственный.

122. Стрелецкий, Н. С. Основы статического учета коэффициента запаса прочности конструкций / Н. С. Стрелецкий. – Москва : Госстройиздат. – 1947. – 94 с. – Текст : непосредственный.

123. Стрелецкий, Н. С. Первоочередные вопросы развития методики предельных состояний / Н. С. Стрелецкий. – Текст : непосредственный // Развитие методики расчета по предельным состояниям. – 1971. – Москва : Стройиздат. – С. 87–95.

124. Теоретическое и экспериментальное исследование потери устойчивости и закритического поведения тонкостенной цилиндрической оболочки при изгибе / В. Г. Баженов, А. И. Кибец, М. В. Петров [и др.]. – Текст : непосредственный // Проблемы прочности и пластичности. – 2009. – Выпуск 71. – С. 77–83.

125. Типовой проект 907-2-262.86. Металлические трубы для отвода дымовых газов с температурой до +350 °С. Трубы Н = 44,225 м : утвержден ГУ проектирования Госстроя СССР 03.11.1986 : дата введения 1987-03-01. – Москва : [б. и.], 1986. – 22 с. – Текст : непосредственный.

126. Типовой проект 907-2-263.86. Металлические трубы для отвода дымовых газов с температурой до +350°С. Трубы Н = 31,815 м : утвержден ГУ проектирования Госстроя СССР 03.11.1986 : дата введения 1986-12-09. – Москва : [б. и.], 1986. – 28 с. – Текст : непосредственный.

127. Типовой проект 907-2-264.86. Металлические трубы для отвода дымовых газов с температурой до +350 °С. Трубы Н = 21,375 м : утвержден ГУ проектирования Госстроя СССР 03.11.1986 : дата введения 1986-12-09. – Москва : [б. и.], 1986. – 18 с. – Текст : непосредственный.

128. Филиппов, В. В. Работоспособность металлических конструкций производственных зданий с геометрическими несовершенствами и коррозионными повреждениями : специальность 05.23.01 «Строительные конструкции, здания и сооружения» : автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук / Филиппов Василий Васильевич ; Центральный научно-исследовательский и проектный институт строительных металлоконструкций им. Н. П. Мельникова. – Москва, 1991. – 34 с. – Текст : непосредственный.

129. Холопов, И. С. Определение пульсационной ветровой нагрузки при расчете вытяжных башен / И. С. Холопов, Д. Д. Чернышев. – Текст : непосредственный // Известия вузов. Строительство. – 2009. – № 6. – С. 105–

112.

130. Чернышев, Д. Д. Исследование обтекания пакета трех труб ветровым потоком с помощью метода контрольных объемов / Д. Д. Чернышев, И. С. Холопов, А. В. Атаманчук. – Текст : непосредственный // Промышленное и гражданское строительство. – 2009. – № 11. – С.40–42.

131. Чернышев, Д. Д. Развитие методики расчета башенных сооружений с пакетами вытяжных труб на ветровую нагрузку / Д. Д. Чернышев. – Текст : непосредственный // Строительная механика и расчет сооружений. – 2010. – № 3. – С. 74–80.

132. Шалабанов, А. К. Исследование докритического состояния и устойчивости цилиндрических и конических оболочек методом голографической интерферометрии / А. К. Шалабанов, А. И. Голованов, М. В. Малеев. – Текст : непосредственный // Исследования по теории пластин и оболочек. – 1981. – Выпуск 16. – С. 138–145.

133. Шимановский, А. В. Методы и мероприятия по устранению дефектов и повреждений при усилении и реконструкции высотных сооружений / А. В. Шимановский, С. М. Кондра. – Текст : непосредственный // Сборник научных трудов украинского института стальных конструкций им. В. М. Шимановского. – 2014. – Выпуск 13. – С. 5–11.

134. Шимановский, А. В. Оценка влияния дефектов и повреждений и их накоплений на работу высотных сооружений / А. В. Шимановский, С. М. Кондра. – Текст : непосредственный // Сборник научных работ Украинского института стальных конструкций имени В. М. Шимановского. – 2014. – Выпуск 14. – С. 5–13.

135. Экспертиза промышленной безопасности производственных зданий и сооружений / В. Г. Сатьянов, П. Б. Пилипенко, В. А. Французов, С. В. Сатьянов. – Москва : ВИСМА, 2003. – 428 с. – Текст : непосредственный.

136. Яровой, С. Н. Оценка технического состояния металлических дымовых труб ОАО «Таганрогский металлургический завод» после длительного срока эксплуатации / С. Н. Яровой. – Текст : непосредственный // Научный вестник строительства. – 2016. – Выпуск 85. – С. 103–108.

137. Яровой, С. Н. Повреждаемость металлических дымовых труб и несущих башен на протяжении жизненного цикла и предельные значения дефектов и повреждений / С. Н. Яровой, В. В. Фурсов. – Текст : непосредственный // Сборник научных трудов «Строительство,

Материаловедение, машиностроение». – 2017. – Выпуск 99. – С. 187–193.

138. Яровой, С. Н. Промышленная безопасность металлических дымовых труб трубопрокатного цеха № 1 ОАО «Таганрогский металлургический завод» / С. Н. Яровой, В. В. Фурсов // Сборник научных трудов «Строительство, Материаловедение, машиностроение». – 2016. – Выпуск 83. – С. 243–249.

139. Инструкция по эксплуатации металлических дымовых труб на тепловых электростанциях / Министерство энергетики и электрификации СССР. Главное техническое управление по эксплуатации энергосистем. – Москва : СЦНТИ, 1970. – 28 с. – Текст : непосредственный.

140. Кричевский, А. П. Рекомендации по эксплуатации промышленных дымовых и вентиляционных труб / А. П. Кричевский, В. И. Корсун. – Макеевка : Донбасская государственная академия строительства и архитектуры. – 1997. – 84 с. – Текст : непосредственный.

141. Правила безопасности при эксплуатации дымовых и вентиляционных промышленных труб : утверждены постановлением Госгортехнадзора РФ от 3 декабря 2001 г. № 56. – Москва : Госгортехнадзор РФ, 2001. – 19 с. – Текст : непосредственный.

142. СП 13-101-99. Правила надзора, обследования, проведения технического обслуживания и ремонта промышленных дымовых и вентиляционных труб : издание официальное : принят и введен в действие постановлением Госстроя России от 14.07.99 № 2 : дата введения 2000-01-01 / разработан Ассоциацией «Ростеплостроймонтаж» при участии ЗАО «Союзтеплострой», ЗАО «Тепломонтаж», АПСФ «Спецжелезобетонстрой». – Москва : Госстрой, 1999. – 27 с. – Текст : непосредственный.

143. ГОСТ 18322-78. Система технического обслуживания и ремонта техники. Термины и определения : межгосударственный стандарт : издание официальное : утвержден и введен в действие Постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 15.11.78 № 2986 : взамен ГОСТ 18322-73 : дата введения 1980-01-01 / разработан и внесен Государственным комитетом СССР по стандартам – Москва : Госкомстандарт СССР, 1980. – 12 с. – Текст : непосредственный.

144. Инструкция по технической эксплуатации промышленных зданий и сооружений предприятий системы Министерства черной металлургии СССР : утверждена приказом Министерства черной металлургии СССР от 9 марта 1967

- г. № 159 / Министерство черной металлургии СССР. – Москва : [б. и.], 1967. – 41 с. – Текст : непосредственный.
145. Нормативные документы по вопросам обследования, паспортизации, безопасной и надежной эксплуатации производственных зданий и сооружений / Государственный комитет Украины по строительству и архитектуре. – Киев : [б. и.], 2003. – 144 с. – Текст : непосредственный.
146. СН 509-78. Инструкция по определению экономической эффективности использования в строительстве новой техники, изобретений и рационализаторских предложений : утверждена постановлением Государственного комитета СССР по делам строительства от 13 декабря 1978 г. № 229 : взамен раздела 5 Инструкции СН 423-71 : дата введения 1979-01-01. – Москва : Госстрой СССР, 1979. – 86 с. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/901708998> (дата обращения: 11.01.2020).
147. ASME STS-1-2000. Steel Stacks. An American national standard : revision of ASME/ANSI STS.1.1992 : was approved by 31 December 1999. – New York : American Society of Mechanical Engineers, 2001. – 88 p. – Текст : непосредственный.
148. ASME STS-1-2006. Steel Stacks. An American national standard : revision of ASME STS-1-2000 : was approved by 13 October 2006. – New York : American Society of Mechanical Engineers, 2006. – 108 p. – Текст : непосредственный.
149. Barlow, J. Optimal stress locations in finite element models / J. Barlow. – Текст : непосредственный // International Journal for Numerical Methods in Engineering. – 1976. – Volume 10. – P. 243–251.
150. Chapelle, D. The Finite Element Analysis of Shells – Fundamentals / D. Chapelle, K. J. Bathe ; springer 2-th Edition. – 2011. – Текст : непосредственный.
151. CICIND. Model Code for Steel Chimneys : the CICIND Chimneys standart : revision 2. – Zürich, Switzerland : CICIND, 2010. – 9 p. – Текст : непосредственный.
152. CICIND. Steel Chimneys Manual. Commentaries and Appendices. – Zürich, Switzerland : CICIND, 2010. – 70 p. – Текст : непосредственный.
153. Clough, R. W. Dynamics of structures / R. W. Clough. – New Jersey : McGraw-Hill Education, 1993. – 768 p. – Текст : непосредственный.
154. DIN 4133. Schornstein aus Stahl : German Standard : Replaces DIN 4133:1973-08 : November 1991. – [Düsseldorf : Verlag], 1991. – 50 p. – Текст :

непосредственный.

155. Escoe, A. K. Pressure Vessel and Stacks. Field Repair Manual / A. K. Escoe. – Houston : [s. n.], 2008. – 196 p. – Текст : непосредственный.

156. EN 1993-1-6:2007. Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1–6: Strength and stability of shell structures = Еврокод 3. Проектирование стальных конструкций. Часть 1–6. Прочность и устойчивость оболочек : supersedes ENV 1993-1-6:1999 : this European Standard was approved by CEN on 12 June 2006. – Brussels : CEN, 2006. – 97 p. – Текст : непосредственный.

157. EN 1993-3-2:2006. Eurocode 3: Design of steel structures – Part 3–2: Towers, masts and chimneys – Chimneys = Еврокод 3. Проектирование стальных конструкций. Часть 3–2. Башни, мачты и дымовые трубы. Дымовые трубы : supersedes ENV 1993-3-2:1997 : this European Standard was approved by CEN on 13 January 2006. – Brussels : CEN, 2006. – 33 p. – Текст : непосредственный.

158. Fatemi, S. M. Experiments on imperfect cylindrical shells under uniform external pressure / S. M. Fatemi, H. Showkati, M. Maali. – Текст : непосредственный // Thin-Walled Structures. – 2013. – No. 65. – P. 14–25.

159. Fifty year of progress for shell and spatial structures / editors: Ihsan Mungan, John F. Abel. – Madrid, Spain : International Association for Shell and Spatial Structures (IASS), 2011. – 492 p. – Текст : непосредственный.

160. Industrial chimneys / edited by CICIND. – Zurich : CICIND, 2005. – 443 p. – Текст : непосредственный.

161. Manohar, S. N. Tall Chimney. Design and Construction / S. N. Manohar. – Bangalore : Torsteel Reserch Foundation in India, 1985. – 272 p. – Текст : непосредственный.

162. Nagtegaal, J. S. On numerically accurate finite element solutions in the fully plastic range / J. S. Nagtegaal, D. M. Parks, J. R. Rice. – Текст : непосредственный // Computer methods in applied mechanics and engineering. – 1974. – Volume 4. – P. 153–177.

163. Schneider, W. Ersatzimperfektionen für den numerischen Beulsicherheitsnachweis stählerner Schalentragerwerke – State of the Art / W. Schneider // Stahlbau. – 2006. – № 75(9). – S. 754–760.

164. Schneider, W. Strukturanalyse schlanker stählerner Kreiszyinderschalen unter statischer Windbelastung : Dissertation / Schneider Werner ; Universität Leipzig. – Leipzig, 2000. – 182 s. – Текст : непосредственный.

165. Davenport, A. G. Wind Effects on Buildings & Structures /

A. G. Davenport, J. D. Riera. – Rotterdam : A. A. Balkema Publishers, 1998. – 500 p. – Текст : непосредственный.

166. Waeyenbergh, G. A framework for maintenance concept development / G. Waeyenbergh, L. Pintelon // *Production Economics*. – 2002. – Volume 77. – P. 299–313.

167. Washington State Bridge Inspection Manual M 36-64.02 / Washington State Department of Transportation. – Washington : [s. n.], 2010. – 377 p. – Текст : непосредственный.

168. Min, L. Optimal bridge maintenance planning based on probabilistic performance prediction / L. Min, D. M. Frangopol. – Текст : непосредственный // *Engineering Structures*. – 2004. – Volume 26. – P. 991–1002.

169. Mohamed A. El-Reedy. Construction Management and Design of Industrial Concrete and Steel Structures / A. Mohamed. El-Reedy. – New York : Taylor and Francis Group, 2011. – 576 p. – Текст : непосредственный.

170. Lifetime-oriented structural design concepts / F. Stangenberg, R. Breitenbücher, O. T. Bruhns [and oth.]. – Berlin : Springer-Verlag, 2009. – 723 p. – Текст : непосредственный.

171. Failure analysis of a corroded smokestack / J. Zhang, J. Pan, X. Tang [et al.]. – Текст : непосредственный // *Engineering Failure Analysis*. – 2015. – Volume 52. – P. 119–129.

ПРИЛОЖЕНИЕ А**Справка о внедрении****ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ
ФИРМА "ПРОМСТРОЙРЕМОНТ"**

ДНР, 83017, г. Донецк, ул. Лазаренко, 63.
ИКЮЛ 31738990, ИНН 9303026357, КПП 930301001, ОГРН 1229300150606
Счёт 40702810220730000249 в Центральном Республиканском Банке ДНР, к/с
№ 30111810645372157115, БИК 042157115
Тел/факс +38(062) 297-18-24, 297-84-74, E-mail: prombudrem@mail.ru

11 января 2023 г.

СПРАВКА

Дана *Оленич Елене Николаевне*, ассистенту кафедры «Металлические конструкции и сооружения» Донбасской национальной академии строительства и архитектуры, в том, что основные положения методики расчета и усиления стальных дымовых труб на оттяжках, разработанные в рамках диссертационной работы на тему «Несущая способность дымовых труб на оттяжках с учётом технического обслуживания», использованы для разработки технической документации по обследованию и оценки остаточного ресурса, дальнейшей эксплуатационной пригодности стальной дымовой трубы Н=20 м на предприятии ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ «ДОНБАСС КОНДИТЕР». Работа выполнялась в рамках договора № 0175/6/22 от 07.11.2022 года, по теме «Обследование дымовой трубы Н=20 м (диаметр 0,7 м)».

Справка выдана для предоставления в диссертационный совет 02.2.001.02 при ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры» для защиты кандидатской диссертационной работы и получения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.1.1 «Строительные конструкции, здания и сооружения».

Генеральный директор



Москаленко В.И.

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Справка о внедрении в учебный процесс



**Министерство образования и науки
Донецкой Народной Республики**
**Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Донбасская национальная академия
строительства и архитектуры»**

286123, ДНР, г. Макеевка, ул. Державина, 2, тел.: +7(856) 343-70-33, email: mailbox@donnasa.ru,
ОКПО 76406710, ОГРН 1229300156535, ИНН 9311020905, КПП 931101001

от 28.10.2022 № 18
на № _____ от _____

Диссертационный совет
02.2.001.02.
при ГОУ ВПО «Донбасская
национальная академия
строительства и архитектуры»

СПРАВКА

о внедрении результатов исследований диссертационной работы Оленич Елены Николаевны на тему «Несущая способность дымовых труб на оттяжках с учётом технического обслуживания», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.1.1 - Строительные конструкции, здания и сооружения, в учебный процесс

Результаты диссертационных исследований Оленич Елены Николаевны, а именно несущая способность дымовых труб с учётом технического обслуживания, внедрены в учебный процесс в качестве учебного материала по таким дисциплинам: Б1.В.ДВ.08.01 «Металлические конструкции (спецкурс)» (в 7 семестре, объемом 2 з.е.), Б1.В.09 «Обследование зданий и сооружений» (в 8 семестре, объемом 2 з.е.) для направления подготовки 08.03.01 «Строительство», профиль «Промышленное и гражданское строительство»; Б1.В.ДВ.05.01 «Испытание и обследование конструкций зданий и сооружений» (в 1 семестре, объемом 4 з.е.); Б1.В.04 «Расчет и проектирование зданий и сооружений» (во 2 семестре, объемом 3 з.е.); Б1.В.ДВ.04.01 «Расчет и проектирование усиления строительных конструкций» (во 2 семестре, объёмом 3 з.е.) для направления подготовки 08.04.01 «Строительство», программа «Теория и проектирование зданий и сооружений (МК)», что отображено в учебных планах и рабочих программах дисциплин (модулей).

Члены комиссии:

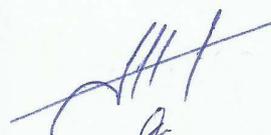
Первый проректор
д.э.н., профессор

Декан строительного факультета,
к.т.н., доцент

Начальник учебной части,
к.т.с., улр, доцент




В.Г. Севка


Э.А. Лозинский


А.А. Сухина

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Результаты натурных исследований стальных дымовых труб с оттяжками

Таблица В1 – Основные повреждения стальных дымовых труб на оттяжках

Наименование типа конструкции	Описание дефекта	Эскиз дефекта
Ствол	Ненормативный крен ствола	
	Коррозия поверхности трубы до 0,5мм	

<p>Коррозионный износ ствола трубы до 35 % поперечного сечения.</p>	
<p>Коррозионный износ ствола трубы до 30 % потеря поперечного сечения. Разрушение антикоррозионного покрытия ствола трубы</p>	
<p>Искривление и разрыв оболочки ствола</p>	

Поверхностная коррозия ствола трубы.
Разрушение антикоррозионного покрытия ствола трубы

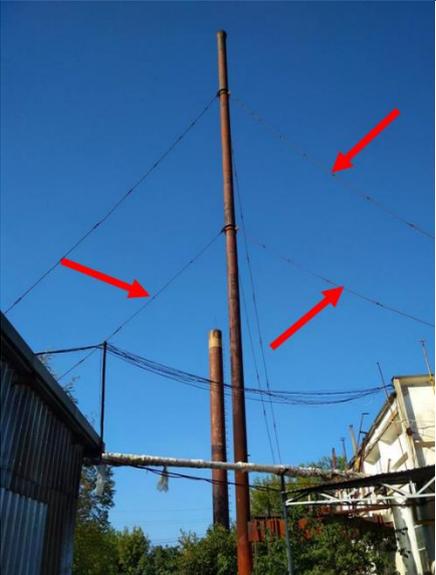


Коррозионный износ стенки в опорной части ствола более 50% потери поперечного сечения



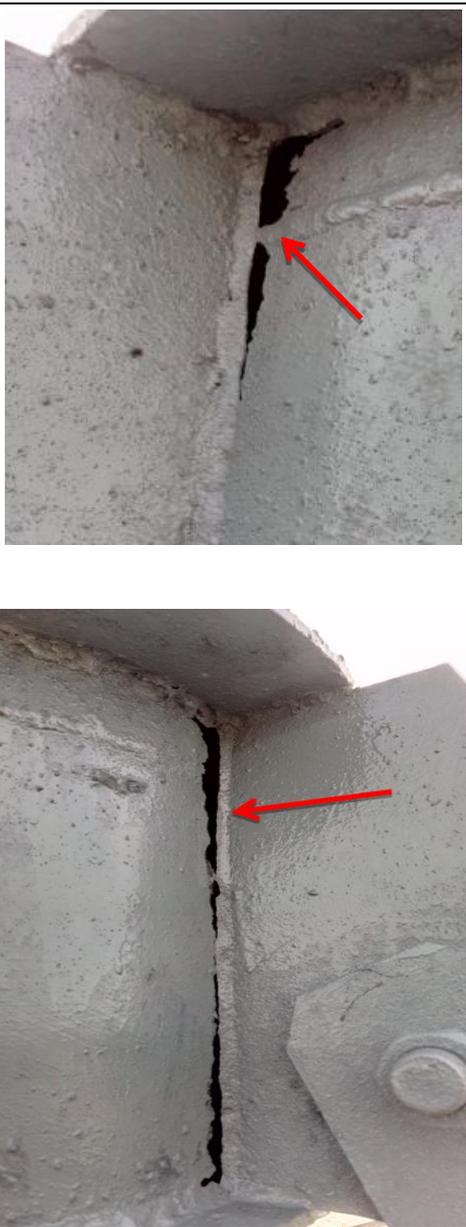
Трещины в металле кожуха и в сварных швах соединения секций дымовой трубы



Оттяжки	Ослабление натяжения оттяжек	
	Ненормативное провисание оттяжек	
	Провисание оттяжек до 300мм	

<p>Обрыв оттяжки 1-го уровня</p>	
<p>Коррозия резьбовых соединений арматуры натяжных устройств до 1мм;</p>	
<p>Разрушение 100% лакокрасочного покрытия оттяжек с последующим образованием поверхностной коррозии</p>	

Фундамент	Сколы бетона в зоне анкерных креплений опорной пластины коррозия арматурной сетки	 A close-up photograph showing significant concrete spalling and delamination around a metal anchor. The exposed surface is uneven and shows signs of weathering and corrosion.
	Коррозия опорной пластины, сварных соединений, анкерных креплений до 0.5мм. Отсутствие гаек на анкерах крепления трубы к фундаментам. Вырез металла опорной пластины в узлах анкерных креплений.	  Two photographs showing corrosion on a steel support plate. The top photo shows a bolt with a hole through the plate, surrounded by rust. The bottom photo shows two anchor bolts on a steel plate, one of which is missing its nut. A person's feet in blue shoes are visible at the bottom of the frame.
	Зазоры между опорной пластиной и фундаментом до 35мм	 A photograph showing a large gap between a steel support plate and the concrete foundation. A wooden stick is placed on the ground to provide a scale for the gap, which is approximately 35mm wide.

	<p>Арматура крепления натяжных устройств к якорям засыпана грунтом, отсутствует гидроизоляция, коррозия видимой части до 2мм, погиби $L=600\text{мм}$, $t=80\text{мм}$</p>	
<p>Лацменный узел</p>	<p>Сквозные коррозионные повреждения в месте примыкания фасонки оттяжек к конструкции трубы.</p>	

	<p>Сквозные коррозионные повреждения в месте примыкания фасонки оттяжек и нижнего кольцевого ребра к конструкции трубы.</p>	
	<p>Сквозные коррозионные повреждения на участке примыкания нижнего кольцевого ребра</p>	
	<p>Коррозия элементов креплений оттяжек к трубе и сварных швов до 0,5 мм.</p>	

<p>Узел сопряжения секций</p>	<p>Сквозные коррозионные повреждения на участке сопряжения секций</p>	
	<p>Коррозия поверхности и сварных швов соединительных фланцев до 0,5 мм</p>	
	<p>Разрушение уплотнительной прокладки в узлах сопряжения секций, щелевая коррозия до 2,5 мм</p>	
<p>Лестницы и площадки</p>	<p>Разрушение элементов крепления лестниц и площадок, разрушение антикоррозионного покрытия</p>	

	<p>Разрыв сварных соединений полос лестничного ограждения, коррозионный износ элементов лестниц.</p>	
Футеровка	<p>Эрозия кирпичной кладки, сколы</p>	
	<p>Выпучивание и вогнутости кирпичной кладки</p>	
	<p>Локальное разрушение кирпичной кладке</p>	

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Экономическая эффективность ремонта дымовых труб на оттяжках

Эксплуатация строительных конструкций имеет цель обеспечить их работоспособное состояние с минимальными затратами. Однако, в настоящее время основной проблемой является недостаточное финансирование существующей модели эксплуатационного процесса.

В работе представлены расчеты экономической эффективности различных вариантов конструктивных решений, которые выполняются на основании [171]. На основании выполненных сметных расчетов приведены исходные данные для расчета сравнительной экономической эффективности вариантов замены и ремонта дымовой трубы.

Таблица Г1 – Показатели для расчета экономической эффективности

Показатели	Ед. изм.	Варианты	
		1	2
1.Трудоемкость работ	чел-час	130,89	413,67
2.Себестоимость работ, в том числе:	тыс.руб.	377,581	992,150
- прямые затраты,	тыс.руб.	324,749	812,323
- материалы;		130,584	659,350
- основная зарплата рабочих;		25,632	103,262
- эксплуатация машин и механизмов	тыс.руб.	19,861	35,075
- зарплата машинистов	тыс.руб.	10,403	14,626

Расчет экономического эффекта от оптимизации проектных решений выполняется по формуле:

$$\mathcal{E} = (Z_1 + Z_{c1})\varphi + \mathcal{E}_s - (Z_2 + Z_{c2})$$

где Z_1, Z_2 – приведенные затраты на заводское изготовление конструкций и материалов по вариантам;

Z_{c1}, Z_{c2} – приведенные затраты на производство работ на стройплощадке по вариантам;

φ - коэффициент учета изменения срока службы конструкций и материалов по сравнению с базовым вариантом;

\mathcal{E}_3 – экономия в сфере эксплуатации зданий за год их службы.

Сроки службы конструкций по вариантам принимаются при замене конструкций дымовой трубы – 10 лет, при ремонте – 4 года. Коэффициент φ определяется как отношение долей стоимости работ за год службы конструкций:

$$\varphi = (377,581/4):(992,150/10) = 0,95$$

Эксплуатационные расходы (затраты на осмотры конструкций, текущие ремонты) за год также примерно одинаковы. Принимаем $\mathcal{E}_3 = 0$.

Экономический эффект определяется, как разница приведенных затрат по вариантам. Приведенные затраты определяются по формуле:

$$Z_i = C_i \varphi + E_n K_i$$

где E_n – среднеотраслевой коэффициент эффективности капитальных вложений (принят 0,15).

В расчете на одну конструкцию:

$$\mathcal{E}_{2-1} = 992,150 * 0,95 - 377,581 = 566,324 \text{ тыс. руб.}$$

По результатам расчёта, можно сделать вывод о значительной экономической эффективности ремонта дымовых труб на оттяжках с использованием усиления лацменного узла. Согласно проведенному расчету, экономическая эффективность данного ремонта составила 566,324 тыс. рублей.

Такая экономическая эффективность связана с несколькими факторами. Во-первых, использование замены оттяжек и усиления лацменного узла позволяют значительно продлить срок службы дымовых труб, и тем самым избежать затрат на полную замену конструкций. Во-вторых, данная методика ремонта способствует снижению риска аварийных ситуаций, повреждений и преждевременного износа, что в свою очередь сокращает расходы на ремонтные работы и оперативное восстановление.