

Оглавление

Введение	10
Глава 1. Жёсткость, прочность и динамика оросительной системы в линейной и нелинейной балочных моделях	13
1.1. Постановка задачи	13
1.2. Расчётная геометрическая балочная модель	15
1.3. Статический линейный анализ	16
1.4. Частотный анализ	26
1.5. Устойчивость	28
1.6. Статический нелинейный анализ	29
1.7. Динамический нелинейный анализ	32
1.8. Динамический линейный анализ	38
1.9. Выводы	43
Глава 2. Анализ применимости стеклопластика для изготовления секции мобильного моста	44
2.1. Постановка задачи	44
2.2. Расчётная геометрическая модель металлической конструкции	46
2.3. Материалы	48
2.4. Граничные условия	49
2.5. Контакты и соединители	51
2.6. Сетка	52
2.7. Результаты и их интерпретация для металлической конструкции	54
2.8. Металлокомпозитный вариант	58
2.9. Сравнительный анализ вариантов конструкции	66
2.10. Выводы	67
Глава 3. Ветровое воздействие на тонкостенный резервуар	68
3.1. Постановка задачи	68
3.2. Способы переноса аэродинамических нагрузок в прочностную модель	70
3.3. Особенности построения геометрической модели	72
3.4. Аэродинамический расчёт	76
3.5. Расчёт на прочность с использованием модели листового металла	82

3.6. Расчёт на прочность с ручным переносом аэродинамических нагрузок в прочностную модель	93
3.7. Искусственный приём автоматического переноса аэродинамических нагрузок в прочностную модель с оболочками	95
3.8. Оценка устойчивости в линейной постановке	97
3.9. Выводы.....	97

Глава 4. Вибрационный анализ прибора

с подвижными элементами.....	99
4.1. Постановка задачи	99
4.2. Особенности построения расчётной модели	100
4.3. Эффективные модели подшипников в задачах собственных частот и вибрации	108
4.3.1. Оценка радиальной жёсткости	108
4.3.2. Оценка осевой жёсткости	119
4.3.3. Виртуальные пружины как аналоги виртуальных подшипников	123
4.3.4. Выводы по прогнозированию характеристик виртуальных подшипников и пружин	126
4.4. Замена подшипников виртуальными сущностями в расчётной модели прибора	127
4.5. Моделирование приводов	130
4.6. Вычислительная модель	131
4.7. Настройки вычислительного процесса.....	133
4.8. Сетка	134
4.9. Результаты по собственным частотам.....	137
4.10. Датчики.....	147
4.11. Результаты расчётов при вибрационном нагружении	148
4.11.1. «Жёсткие» подшипники, возбуждение по z	149
4.11.2. «Податливые» подшипники, возбуждение по z	153
4.11.3. «Жёсткие» пружины, возбуждение по z	154
4.11.4. «Жёсткие» подшипники, возбуждение по x	155
4.11.5. «Жёсткие» подшипники, возбуждение по y	157
4.11.6. «Податливые» подшипники, возбуждение по x	159
4.11.7. «Жёсткие» пружины, возбуждение по x	159
4.11.8. «Податливые» пружины, возбуждение по x	161
4.12. Влияние демпфирующих свойств системы на динамику	162
4.13. Факторы, снижающие точность расчёта.....	164
4.14. Практическая ценность результатов	164
4.14. Выводы.....	167

Глава 5. Рациональные алгоритмы и настройки для расчёта гидродинамики центробежного насоса с параметрическим анализом и оптимизацией	168
5.1. Постановка задачи.....	169
5.2. Расчётная модель.....	170
5.3. Граничные условия и настройки вычислительного процесса.....	175
5.4. Анализ влияния настроек сетки на сходимость и точность.....	184
5.5. Учёт сжимаемости жидкости.....	191
5.6. Анализ кавитации.....	194
5.7. Выводы из исследований по подготовке моделей и анализу настроек вычислительного процесса.....	195
5.8. Параметрический анализ и оптимизация.....	197
5.9. Выводы из параметрических и оптимизационных исследований.....	210
Глава 6. Динамика виброизолированных систем	211
6.1. Постановка задачи.....	211
6.2. Типовые конструкции виброизоляторов и их свойства.....	213
6.3. Типовые испытания.....	218
6.4. Термины и определения.....	221
6.5. Моделирование простой колебательной системы.....	223
6.5.1. Постановка задачи.....	223
6.5.2. Использование модели движения.....	223
6.5.3. Идентификация демпфирующих характеристик в модели движения.....	253
6.5.4. Моделирование простой колебательной системы в прочностной модели.....	255
6.5.5. Идентификация демпфирующих характеристик в прочностной модели.....	269
6.6. Вибрационный анализ в прочностной модели.....	270
6.7. Оценка демпфирования в направлениях x и y	275
6.8. Типовые схемы крепления аппаратуры посредством виброизоляторов.....	278
6.9. Реализация практической модели динамических испытаний.....	279
6.9.1. Базовая геометрическая модель.....	279
6.9.2. Реализация динамической схемы в модели движения: вибрация.....	287
6.9.3. Динамика системы в модели движения: вибрация.....	291
6.9.4. Динамика системы в модели движения: удар.....	295
6.9.5. Реализация динамической схемы в прочностной модели.....	297
6.9.6. Динамика системы в прочностной модели: вибрация.....	306

6.9.7. Динамика системы в прочностной модели: случайные колебания	312
6.9.8. Динамика системы в прочностной модели: удар	316
6.10. Использование функционала нелинейной динамики для имитации удара и вибрации	321
6.11. Библиотеки и стандартные объекты	321
6.12. Перспективы	325
6.13. Выводы	325
6.14. Технические аспекты	326
Глава 7. Тепловой расчёт пульта нагрузок	328
7.1. Постановка задачи	328
7.2. Адаптация геометрической модели для гидрогазодинамики	330
7.3. Расчётная модель	330
7.4. Иерархическое представление и присвоение граничных условий	336
7.4.1. Локальная модель резистора	337
7.4.2. Локальная модель арматуры резистора	340
7.4.3. Локальная модель платы	341
7.4.4. Локальная модель блока резисторов	344
7.4.5. Глобальная модель прибора	345
7.5. Особенности моделирования сетки (решётки) на входе и выходе	347
7.6. Настройки расчётной сетки	350
7.7. Настройки вычислительного процесса	353
7.8. Анализ вычислительного процесса	357
7.9. Результаты и их интерпретация	358
7.10. Оценка влияния постановки задачи на тепловое состояние конструкции	363
7.10.1. Гравитация и потенциал давления	364
7.10.2. Наличие сеток на входе и выходе	365
7.10.3. Условия снаружи	368
7.10.4. Влажность	371
7.11. Расчёт эффективных тепловых характеристик проволочного сопротивления	373
7.11.1. Построение типовой ячейки	373
7.11.2. Эффективная теплопроводность по оси z	376
7.11.3. Эффективная теплопроводность по оси x	379
7.11.4. Удельная теплоёмкость	381
7.11.5. Выводы по задаче расчёта эффективных тепловых характеристик	385
7.12. Анализ характеристик вентилятора для использования в расчётной модели	385
7.13. Эффективные характеристики сетки как пористой среды	394

7.14. Выводы	399
7.15. Доработка модели по результатам анализа	400

Глава 8. Тепловой расчёт редуктора с принудительным

воздушным и водяным охлаждением	409
8.1. Постановка задачи	409
8.2. Традиционная методика полуэмпирического анализа	411
8.3. Методология совместного использования численного метода и полуэмпирического расчёта	412
8.4. Адаптация геометрической модели для гидрогазодинамики.....	413
8.5. Расчётная модель	419
8.6. Результаты и их интерпретация	432
8.7. Выводы	437

Глава 9. Гидродинамический тепловой анализ

автомобильного радиатора – многоуровневая модель	438
9.1. Постановка задачи	439
9.2. Варианты построения вычислительной модели	442
9.3. Структура многоуровневой модели.....	444
9.3.1. Радиатор	445
9.3.2. Трубка для пограничного слоя	447
9.3.3. Трубка для сопротивления условной среды.....	455
9.3.4. Пористая среда для местного сопротивления в трубке.....	459
9.3.5. Пористая среда для сопротивления блока трубок	461
9.3.6. Сопротивление по воде с местными сопротивлениями трубок.....	463
9.3.7. Сопротивление по воде на глобальной модели с блоком, имитирующим пакет трубок.....	467
9.3.8. Ячейка для теплоотдачи от воды к воздуху	473
9.3.9. Учёт изменения температуры по высоте	490
9.3.10. Поправка по мощности на излучение трубок и пластин в среду	495
9.3.11. Поправка по мощности на теплообмен окружения с бачками и рамой	498
9.3.12. Полная мощность	504
9.3.13. Ячейка для воздушного сопротивления	505
9.3.14. Полное воздушное сопротивление	507
9.4. Составляющие теплоотдачи и интегральные характеристики радиатора	508
9.5. Выводы по расчёту исходной конструкции	509
9.6. Улучшение тепловых характеристик.....	510
9.7. Расчёт модифицированной конструкции	515

Глава 10. Термоупругость автомобильного радиатора	519
10.1. Постановка задачи	520
10.2. Варианты построения геометрической расчётной модели	520
10.3. Эффективные свойства однородной среды, имитирующей массив пластин	522
10.3.1. Эффективные свойства в направлении оси z	524
10.3.2. Эффективные свойства в направлении оси x	532
10.3.3. Эффективные свойства в направлении оси y	535
10.3.4. Термоупругое состояние	538
10.3.5. Эффективные свойства в плоскости yz	542
10.3.6. Эффективные свойства в плоскости zx	550
10.3.7. Эффективные свойства в плоскости xy	552
10.3.8. Вычисление эффективных характеристик по результатам виртуальных экспериментов	557
10.3.9. Выводы по расчёту эффективных характеристик	559
10.4. Расчётная модель радиатора	561
10.5. Настройки вычислительного процесса	564
10.6. Результаты и их интерпретация	571
10.7. Термоупругая модель с переменной температурой	571
10.8. Выводы	576
Глава 11. Кинематика, динамика и точность циклоидальных передач	577
11.1. Описание циклоидальной передачи	577
11.2. Решение для кинематической системы	579
11.3. Решение для динамической системы	586
11.4. Анализ точности механизма	594
11.5. Выводы	596
Глава 12. Расчёт четырёхпролётного анкерного участка линии электропередачи	597
12.1. Постановка задачи	597
12.2. Расчётная модель	598
12.3. Расчёт по упругой нелинейной модели для одной плети	599
12.4. Расчёт по модели движения для одного пролёта	605
12.4. Расчёт по модели движения для трёх пролётов с гирляндами	617
12.5. Учёт других нагрузок	622
12.6. Выводы	625
Глава 13. Опорожнение бака с воздухом через клапан	626
13.1. Постановка задачи	626
13.2. Методологические особенности задачи опорожнения сосуда	627

13.3. Расчёт посредством калькулятора: исходные данные	630
13.3.1. Вычислительная модель для расчёта массового расхода в нестационарной постановке.....	631
13.3.2. Использование калькулятора: процедура и результаты	641
13.4. Пошаговая имитация сброса давления	644
13.4.1. Вычислительная модель	644
13.4.2. Пошаговый алгоритм с учётом неизотермического характера процесса	645
13.4.3. Реализация пошагового алгоритма во Flow Simulation.....	649
13.4.4. Сравнение результатов калькулятора и численного расчёта	655
13.5. Выводы.....	656
Литература.....	657

Введение

Книга продолжает серию публикаций, посвящённых решению инженерных задач в среде SOLIDWORKS Simulation, включающей инструменты для анализа прочности – собственно Simulation; гидрогазодинамики и теплопередачи – Flow Simulation; кинематики и динамики механизмов – Motion. Материал основан на опыте автора, приобретённом при работе над совместными проектами с клиентами фирмы «Группа компаний SWR»¹, а также в ходе общения с коллегами.

В отличие от недавнего прошлого, когда программные продукты зачастую нуждались в постоянной поддержке разработчиков, современные инструменты являются «отчуждаемыми», содержат развитую справочную систему и документацию и, в принципе, позволяют обладателю обходиться без взаимодействия с поставщиком программного обеспечения. Реальность же такова, что вполне традиционные для компьютерного моделирования задачи демонстрируют особенности, где навыков прикладного специалиста может не хватить, а возможности обучения ограничены по объективным и личным причинам. Поэтому службам технической поддержки, обучения и внедрения нужно выходить за рамки своих названий, занимаясь детальным освоением инструмента на прикладных задачах. При работе с конкретным пользователем далеко не всегда можно ограничиться частными вопросами – приходится погружаться в некий круг проблем и строить вполне универсальные модели, пригодные для «тиражирования» на основе обмена опытом или обладающие коммерческой ценностью.

Упорядочить эту деятельность, сделать её рациональной можно вполне естественным образом. На каком-то этапе инструменты компьютерного моделирования существовали в значительной степени независимо от традиционных расчётных методик, пересекаясь с ними при верификации алгоритмов и проверке результатов, но тотальное их распространение заставляет соотносить или, как выражаются, гармонизировать инструменты с действующими правилами и нормативами. Иногда это движение является встречным – новая техническая база при фактической невозможности использования старой (аналитических оценок, трудоёмкого эксперимента, опытного персонала) заставляет нормативы «приспособиться» к компьютерному моделированию. Соответственно, компьютерные технологии должны соответствовать нормативам, а иногда и детально воспроизводить описанные в них испытания. Разумеется, на уровне пользователя почти невозможно совместить аналитические и эмпирические зависимости из нормативов с «чужими» программами, но же-

¹ До 2017 года фирма называлась «SolidWorks Russia».

лательно как можно точнее воспроизвести постановку задач в виде граничных условий, свойств сред и материалов, а также номенклатуру результатов и способ их интерпретации.

Получается, что иногда обычная схема освоения программ и методика обучения, где преобладает движение от общих свойств инструментов к частному их проявлению в наперёд заданных ситуациях (попросту говоря, учебных примерах), нарушается. Она эффективна при условии, что в понимании специалиста реакция инструмента (программы) на воздействие (постановку задачи, реализацию её в расчётной модели, настройки вычислительного процесса в значительной степени) прогнозируема. Разнообразие описанных в книге задач не позволило автору подойти к ним с наперёд заданной установкой. Прикладной инженер-расчётчик (а то и «конструктор-расчётчик») тем более не обладает соответствующими ресурсами.

Проблема зафиксирована в названии книги: «SOLIDWORKS Simulation и FloEFD. Практика, методология, идеология», которое соответствует классической (материалистической!) формулировке процесса познания. Оно, как известно, происходит в единстве чувственной последовательности: ощущение, восприятие, представление – и рационального отражения действительности: понятие, суждение, умозаключение. Включение чувственной компоненты – не дань стилю, а описание реальности, когда некие свойства системы (спорные результаты, неоднозначное поведение вычислительных алгоритмов, интерфейса) изначально воспринимаются на уровне ощущений, иногда противоречивых, с последующим «подключением» мышления. Мы не претендуем на то, что после решения задач, помимо, разумеется, их результатов, появятся умозаключения, понимаемые как новые знания. Но проблемы, вплоть до отдельных этапов: обсуждение, постановка, решение, – постараемся описывать так, чтобы возникли формализованные связи, логические последовательности, рекомендации, методики, позволяющие использовать их неоднократно. В противном случае работа окажется напрасной и популярная¹ мысль И. Канта: «Отсутствие способности суждения есть, собственно, то, что называют глупостью, и против этого недостатка нет лекарства...» – найдёт лишнее подтверждение.

Из-за установки на полноту описания задач большие фрагменты текста могут почти повторяться. Для компьютерной литературы напрашивается активное использование ссылок, однако злоупотребление ими затрудняет и восприятие текста, и его написание. Более того, чувствительность вычислительных алгоритмов такова, что отклик на малейшие отклонения в настройках может быть критическим. Поэтому, за малым исключением, сокращения в описании логических и технических манипуляций минимальны.

Иногда изложение расширено относительно минимума, необходимого для представления собственно решения. Это сделано для расширения кругозо-

¹ В «философском» сегменте Интернета.

ра пользователя и демонстрации функционала программы в его разнообразии, как своего рода дань профессиональной деформации автора: объяснять и обучать, рекламируя и продавая.

Большинство расчётов выполнено в версии SOLIDWORKS 2017 года, иногда – 2016 и даже 2015. Когда книга готовилась к печати, рабочей была версия 2018. В случае появления нового функционала, существенно облегчающего решение задач (в силу огромной трудоёмкости, необходимой для пересчёта в новой версии, остаётся всё-таки прибегнуть к иррациональным аргументам и поверить в то, что, собственно, результаты не изменятся), автор постарался внести соответствующие комментарии.

Почти все геометрические модели, использованные в расчётах, предоставлены пользователями программ. Как правило, названия соответствующих фирм упоминаются в тексте. В остальных случаях это невозможно из-за конфиденциального характера информации. Тогда приведённые расчётные конфигурации имеют существенное отличие от оригиналов, а их воспроизведение не гарантирует работоспособности получившихся изделий.

Flow Simulation является одной из реализаций продукта FloEFD, имеющего также варианты интеграции в системы проектирования Creo, Siemens NX, Solid Edge и Catia V5. Поскольку функционал и, в значительной степени, интерфейс соответствующих модулей имеют много общего с Flow Simulation, данный материал в части гидрогазодинамики и теплопередачи будет полезен тем, кто использует эти решения.

В тексте интерфейсные элементы Simulation и Flow Simulation приводятся в русском варианте совместно с вариантом на английском. Это сделано для повышения эрудиции и для некоторых пользователей, предпочитающих оригинальную терминологию¹. Поскольку SOLIDWORKS и Motion традиционно используются в русском варианте, то соответствующие названия даются только на русском.

Автор благодарит своих коллег, сотрудников фирмы «Группа компаний SWR» за консультации при работе над материалом, а руководство – за помощь в издании книги.

¹ Качество перевода интерфейса и терминов в целом является удовлетворительным, но, к сожалению, в зависимости от версии программы перевод может измениться не в лучшую сторону.

Жёсткость, прочность и динамика оросительной системы в линейной и нелинейной балочных моделях

Решается задача расчёта жёсткости и прочности секции оросительной системы в статике и динамике. Привлекается функционал балочного моделирования совместно с нелинейным и динамическим алгоритмами. Силовая схема образована длинными трубами, раскосами и растяжками. Перемещения и деформации достаточно велики, это может повлиять на жёсткость гибких элементов, что порождает нелинейность при сохранении материалами упругих свойств.

Автор благодарит сотрудников фирмы ТОО «Казстройпроект-ПВ» за предоставленную геометрическую модель. Задача решалась совместно с сотрудником фирмы «Группа компаний SWR» В. А. Куликовым.

1.1. Постановка задачи

Фотография конструкции показана на рис. 1.1. Она собрана из секций, в основе каждой – труба, состоящая из нескольких прямолинейных отрезков, соединённых фланцами, оси которых расположены под некоторым углом к оси трубы. Поэтому в совокупности отрезки описывают дугу, выпуклость которой направлена вверх. Снизу расположены две линии тяг, которые через раскосы – два треугольника с общей стороной – соединены с трубой. С одной стороны секция опирается на собственное шасси велосипедной схемы, а на другом конце к трубе приварен кронштейн в форме крючка, который будет опираться на подвижную опору следующей секции.



Рис. 1.1. Оросительная система

Модель секции в сборе, а также типовые фрагменты показаны на рис. 1.2. Профили соединяются болтами: непосредственно друг с другом или через кронштейны, для чего концы труб сплющены до плоского состояния. С трубами тяги и раскосы соединены посредством сварных кронштейнов.

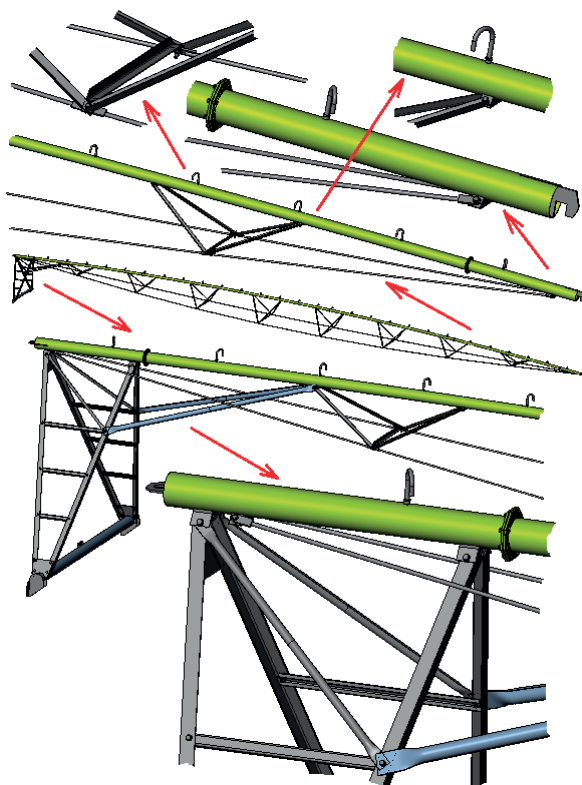


Рис. 1.2. Исходная геометрическая модель секции

1.2. РАСЧЁТНАЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ БАЛОЧНАЯ МОДЕЛЬ

Из-за большой протяжённости элементов конструкции для расчёта наиболее рациональной является балочная модель. Для растяжек она, по сути, единственно возможная – единственной разумной альтернативой в рамках функционала Simulation могут быть виртуальные пружины, но их разумно использовать вместе с телами или оболочками, так как прикрепить конец пружины непосредственно к балке невозможно. Вообще говоря, опыт использования комбинированных сеток, сочетающих балки с телами и оболочками, свидетельствует, что рациональным подходом является членение конструкции на узлы, в каждом из которых используется однородное представление. Такова, например, задача расчёта полуприцепа-цистерны [5], где бак с внутренними усилителями, лонжероны и седловая опора моделировались оболочками, а рама с подвеской – элементами тел. Проект, особенностью которого было сочетание гибких криволинейных профилей с сечениями сложной формы с гибкими соединителями при наличии тонких стяжек [6], оказался более трудоёмким. Подобно рассматриваемой конструкции, некоторые кронштейны связаны гибкими тонкими стяжками. В той ситуации вычленив «рафинированную» балочную систему было невозможно, поскольку податливые узлы соединений несущих балок нельзя классифицировать как шарнирные или жёсткие.

Преимуществом балочной модели является ассоциативность с геометрической моделью после модификации сечений при условии, что балки построены командами группы **Сварные детали**. Если на входе были качественно параметризованные компоновочные эскизы, то модель может применяться для проектирования как в «ручном» режиме, так и посредством исследований проектирования – в последнем случае с перебором по таблице или с использованием упрощённого алгоритма оптимизации.

В данном случае элементы сварной конструкции базировались на эскизах, произведённых на базе готовой модели, и, соответственно, унаследовали некоторые её неточности. В принципе, можно было на уровне Simulation трактовать тела (полученные иными, чем сварные конструкции, командами) как балки. Однако изрядная сложность структуры исходной модели делает полное перестроение модели через балки более надёжным. Результат показан на рис. 1.3. С точки зрения оформления чертежей, это не лучший вариант, поскольку между элементами каркаса присутствуют интерференция и зазоры (при соответствующих настройках программа вводит искусственные соединители между концом одной балки и концом или телом другой, поэтому искусственно «дотягивать» балки друг до друга не рекомендуется), но модель содержит всю необходимую информацию для расчёта. Некоторые профили, в частности раскосы, расчленены (или изначально выполнены) на три отрезка. Это было сделано для качественного сопряжения с деталями с другими типами сеток, поскольку зона связи достаточно мала и требуется организовать некоторое число балочных

конечных элементов в ограниченной зоне. Локальное уплотнение сетки возможно только целиком для балки, но не для её концов (соединений).

Для имитации опирания на колёса введены отрезки балок «разумной» жёсткости, нижние концы которых расположены на уровне земли. В соответствующих соединениях будут поставлены соответствующие граничные условия. В моделях с сетками оболочек или тел в подобных ситуациях используются дистанционные перемещения.

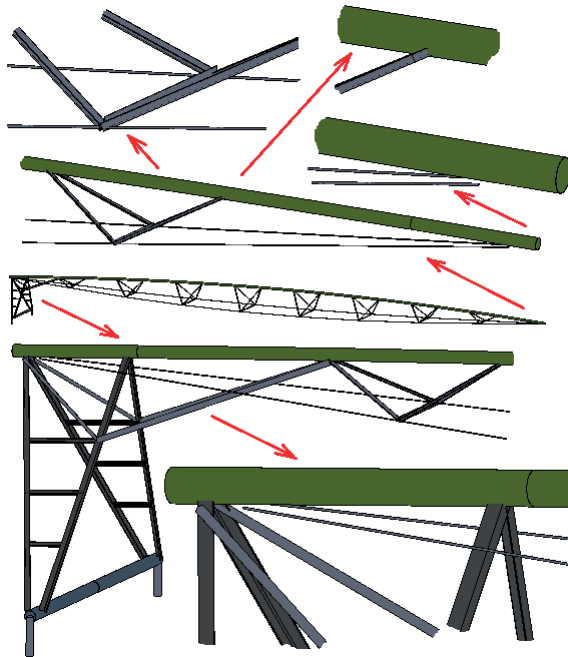


Рис. 1.3. Геометрическая модель, адаптированная для балочного расчёта

1.3. СТАТИЧЕСКИЙ ЛИНЕЙНЫЙ АНАЛИЗ

После создания статического исследования все объекты модели автоматически интерпретируются как балки, а система делает попытку каким-то образом трактовать схему соединений. Результат показан на рис. 1.4. Программа высвечивает розовым цветом соединения, в которых пересекается несколько элементов конструкции, и светло-зеленым цветом соединения элементов конструкции в свободных концах. То есть растяжки не были прикреплены ни к раскосам, ни к трубе. Привязать свободный конец можно из контекстного окна, вызываемого правой кнопкой мыши над соответствующим соединени-

ем (концом элемента). Получив окно, можно выбирать балки, к которым это соединение хочется привязать (рис. 1.5). Следует обратить внимание, чтобы опция **Использовать модифицированное соединение при обновлении** (Keep modified joint on update) была активна, что позволит учесть сделанные вручную изменения после перерасчёта соединений. Перерасчёт осуществляется нажатием кнопки **Вычислить** (Calculate). Результат показан на рис. 1.6. К слову сказать, исключение балки из связи с неким соединением осуществляется тем же алгоритмом – убрать элемент из окна **Выбрать соединения** (Select Joint Members) можно, щёлкнув по нему в модели. Надо сказать, что разрыв связей – достаточно актуальная манипуляция в ситуациях, когда структурные элементы близки друг к другу или пересекаются, но механически не связаны. Характерный пример – тяга из левого конца трубы и раскос, примыкающий к опоре. Иногда это две гибкие тяги, которые могут касаться.

Если число элементов, автоматически не связавшихся в соединениях, значительно, есть смысл перейти от состояния переключателя **Рассматривать шарнир для зазора** (Treat as joint for clearance) **равно нулю (касание)** (equal to zero (touching)) к **меньше чем** (less than) с назначением величины допуска, фактически диаметра сферы, при попадании в которую концы будут связаны общим соединением. Однако нужно соблюдать баланс между желаемой точностью в структуре соединений и точностью их реализации.

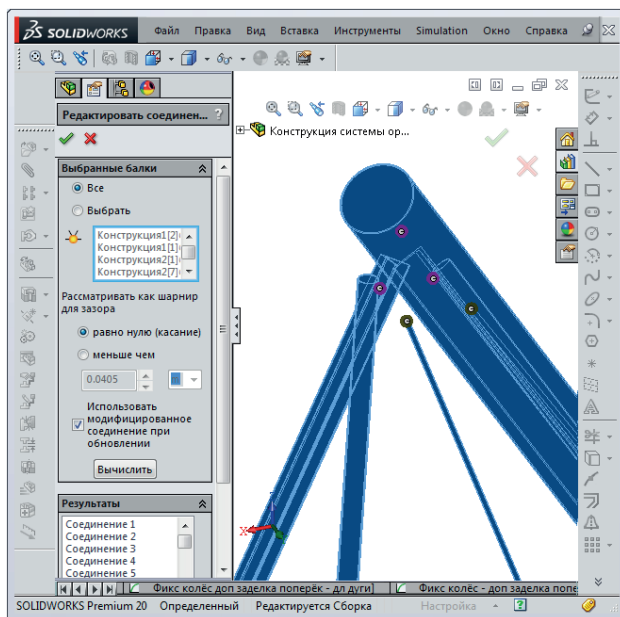


Рис. 1.4. Фрагмент схемы соединений, созданных автоматически

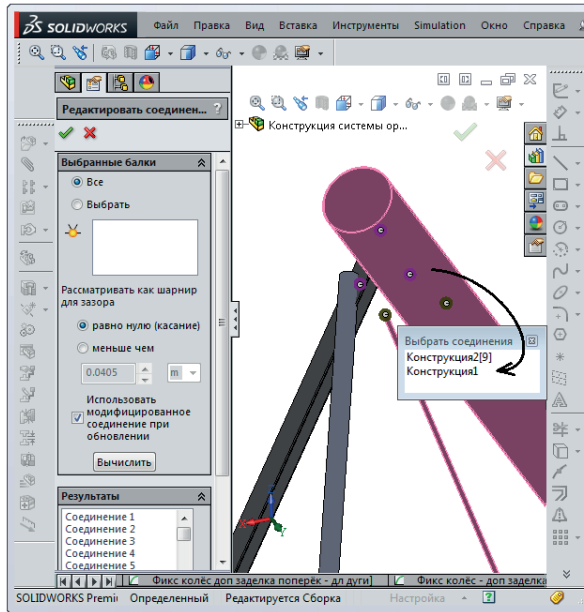


Рис. 1.5. Корректировка привязки балок к соединению

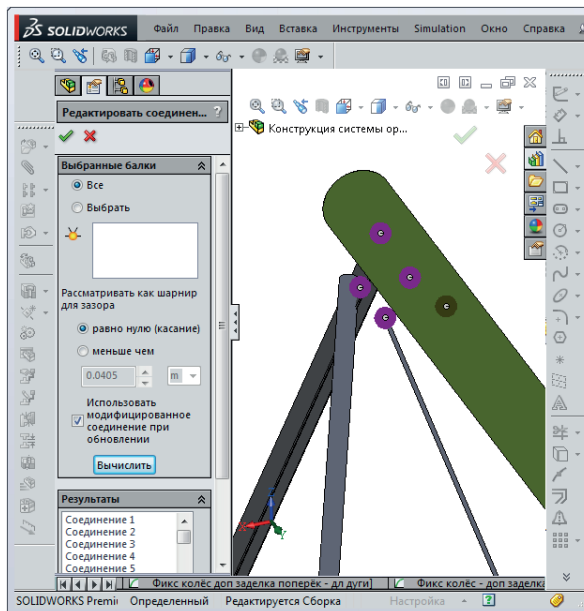


Рис. 1.6. Результат корректировки соединения

По умолчанию все элементы воспринимаются как балки, то есть перемещения и углы поворота на концах равны перемещениям элементов, которым принадлежит данное соединение. Изменить это можно посредством команды **Редактировать определение** (Edit Definition), подаваемой из контекстного меню пиктограммы тела балки. В одноимённой панели (рис. 1.7) следует перейти в ручной режим управления соединением, после чего «освободить» требуемые степени свободы. В данном случае превращаем растяжку в шарнирную балку (стержень). Для этого на одном конце три угловые степени свободы превращаем в шарниры, а на втором – только повороты относительно направлений балки 1 и 2. Дело в том, что если на обоих концах прямого стержня освободить продольные повороты, то он приобретает моду движения как жёсткого целого, что делает решение неустойчивым.

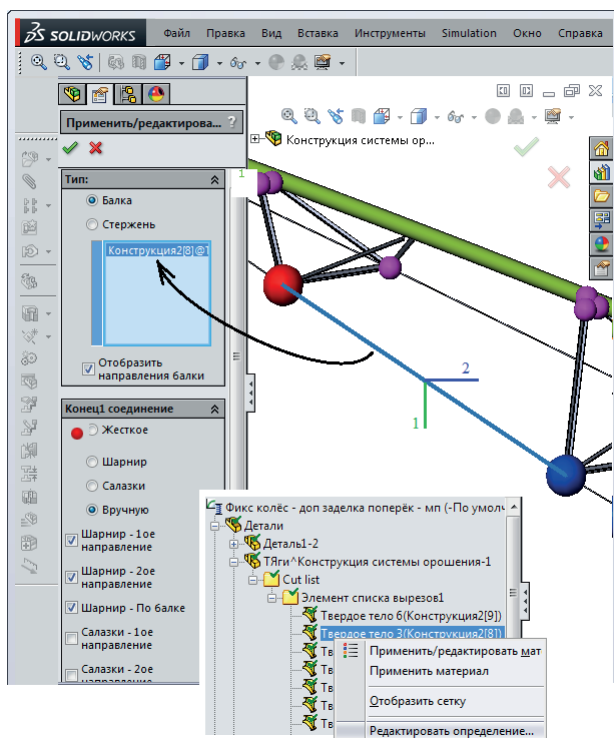


Рис. 1.7. Изменение схемы привязки балки к соединению

Граничные условия показаны на рис. 1.8. Перемещения опор шасси ограничены в вертикальном и продольном направлениях, узла на конце – вертикально и поперёк. При этом остаётся мода вращения относительно вертикальной оси вокруг конца, которая устраняется вводом поперечной заделки в середине

балки шасси (для чего она была выполнена из двух балок, в результате чего получилось соединение для фиксации). Из-за особенностей ориентации модели в осях сборки (когда её выполняли, о последующем расчёте не задумывались) заделки и сила тяжести ориентируются не в глобальной системе координат, а относительно плоскости, проходящей через концы балки.

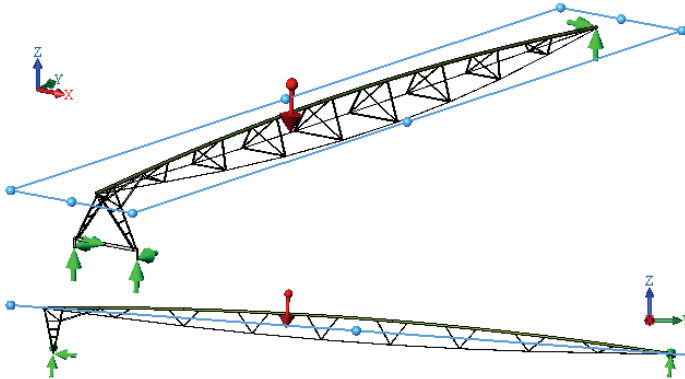


Рис. 1.8. Граничные условия

Как видно, в качестве внешней нагрузки выступает только сила тяжести. Другие составляющие нагрузки в виде веса воды, наполняющей трубу, привода оси, который ликвидирован в результате упрощений, фланцев между отрезками труб, заменяем назначенными силами. В статическом анализе это удобно, поскольку в балочной модели их можно прикладывать как к соединениям, так и к балкам. Однако последующие динамические модели: расчёт собственных частот и собственно динамика – требуют корректных инерционных свойств, чего описанный алгоритм не даёт. В рафинированной балочной модели (в отсутствие тел и оболочек) инструменты ввода искусственных масс: распределенных, дистанционных, являющихся результатом преобразования тел – отсутствуют¹. Единственным способом является изменение массы балок, чтобы в них учитывались инерционные нагрузки, воздействующие на балки или связанные с ними объекты. Например, если масса воды в одном метре трубы составляет 20,6 кг, а собственная масса трубы 9,95 кг, то при плотности материала трубы 7700 кг/м³ плотность условного материала должна быть $7700 \times (20,6 + 9,95) / 9,95 = 23641$ кг/м³.

Фланцы «размазываем» по трубе в предположении, что полная их масса 60 кг равномерно распределена по трубе длиной 58,3 м. Тогда эффективная плотность должна повыситься до 24 435 кг/м³.

¹ В современных версиях Simulation к балкам могут присоединяться дистанционные и распределённые массы. В данном случае следует использовать распределённую массу, поскольку «удалённая», будучи приложенной к балке, превратит её в абсолютно жёсткую.

Учёт массы привода осуществляем посредством двух балок, присоединённых к середине балки шасси (рис. 1.9) Их длины и сечения являются произвольными (разумными), а плотность рассчитывается, исходя из получившегося объёма.

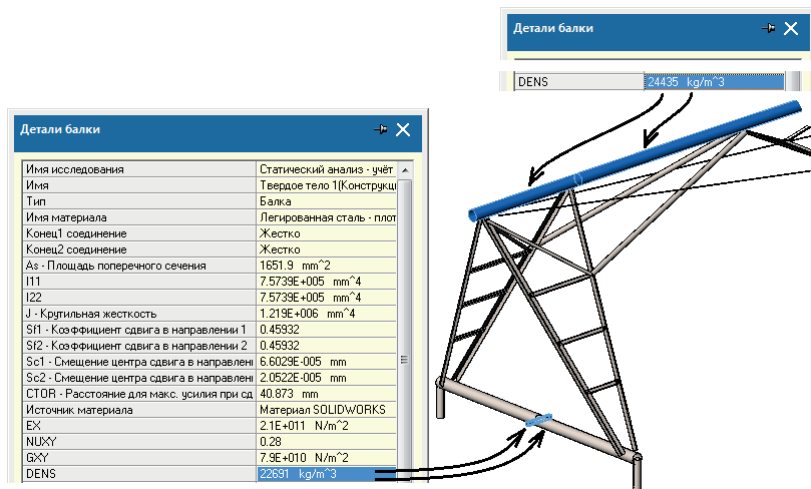


Рис. 1.9. Тело, воспроизводящее привод и материал, обеспечивающий массу привода

Если использовать настройки статического решателя по умолчанию (рис. 1.10), то распределение вертикальных перемещений получится, как показано на рис. 1.11. Обращает внимание провисание растяжек, объясняемое неполнотой расчётной модели – в ней не учитывается увеличение мембранной жёсткости из-за растяжения. Наиболее надёжным инструментом в таких ситуациях является нелинейное решение с включением опции **Большие перемещения** (Large displacement), подразумевающей последовательное и синхронное увеличение всех силовых факторов (реализованных в том числе и через назначенные перемещения) в рамках статической модели или посредством собственно нелинейного анализа. Выяснилось, что при формальной доступности опции для балочной модели она неработоспособна¹. Попробуем использовать опцию **Учёт влияния нагрузок на собственные частоты** (Use inplane effect) (рис. 1.12). Как видно, в русскоязычном интерфейсе перевод заимствован из соответствующей строки в частотном исследовании. Исторически это более ранний (по сравнению с методом последовательных нагружений) алгоритм, когда после решения оцениваются мембранные нагрузки и на этой основе корректируется жёсткость, затем решение выполняется ещё раз.

¹ В базе знаний SolidWorks – Knowledge base это заключение подтверждается.

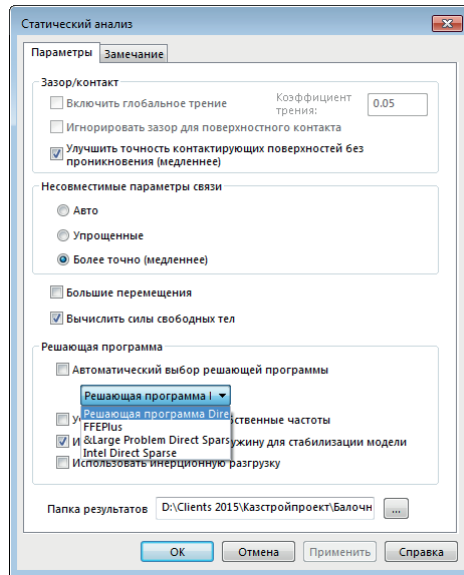


Рис. 1.10. Настройки статического решателя по умолчанию

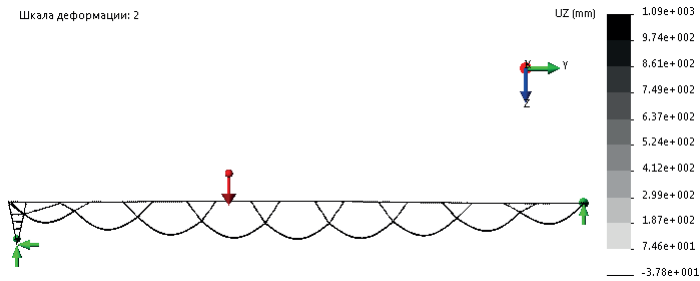


Рис. 1.11. Вертикальные перемещения на фоне деформированного вида

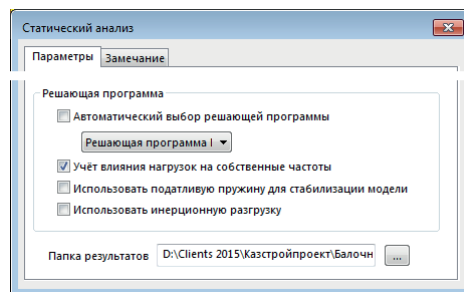


Рис. 1.12. Модифицированные настройки статического решателя

Деформированный вид оказывается вполне правдоподобным, однако если отобразить перемещения в поперечном направлении (рис. 1.13), то налицо дефект модели в виде отсутствия соединения некоторых раскосов с трубой. Он появился из-за того, что в соответствующие соединения не «подключилась» труба. Корректируем эти соединения вручную (рис. 1.14).

Также налицо асимметрия перемещений в этой зоне, в то время как вдоль трубы она соблюдается. Как выяснилось, поперечная (горизонтальная) балка этого раскоса неортогональна вертикальной плоскости, в то время как остальные перпендикулярны.

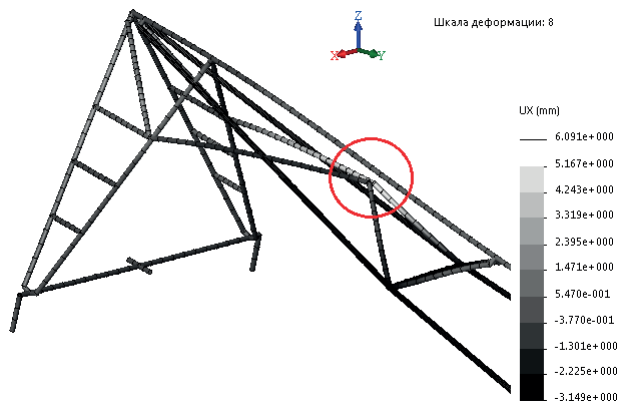


Рис. 1.13. Поперечные перемещения

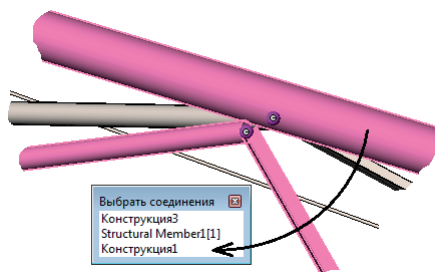


Рис. 1.14. Изменение схемы привязки балки к соединению

При внимательном рассмотрении сетки выясняется, что отсутствие связи между раскосами и трубой можно было диагностировать на этапе построения сетки. Её варианты: полученный с настройками «по умолчанию» и после их корректировки – показаны на рис. 1.15.

Вертикальные перемещения, полученные с модифицированными настройками, показаны на рис. 1.16. Деформированный вид стал вполне правдоподобным, однако интересно, что перемещения собственно трубы оказались

практически такими же, как и ранее. То есть алгоритмы изменили изгибную жёсткость деформированных растяжек, не повлияв на мембранную. Вопрос в том, насколько последняя корректно интерпретируется алгоритмом. Так что заключение о правильности результатов откладываем дальше – до применения нелинейного анализа.

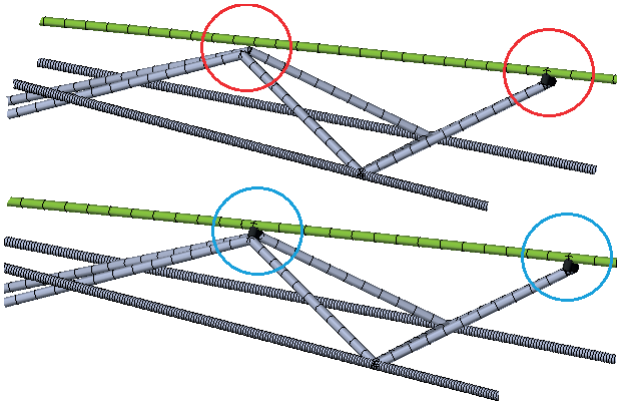


Рис. 1.15. Сетка до и после корректировки соединений

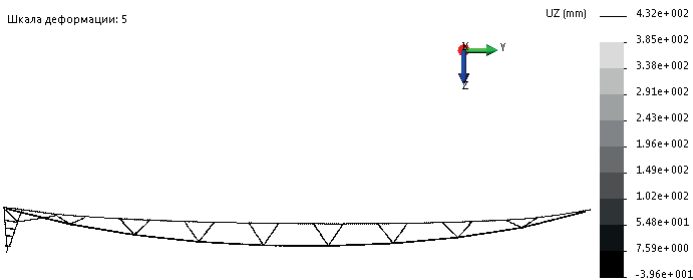


Рис. 1.16. Вертикальные перемещения на фоне деформированного вида

Важная информация содержится на эпюре осевой силы, показанной на рис. 1.17¹. Здесь важно удостовериться, что в тонких растяжках действуют именно растягивающие силы. В противном случае результаты становятся принципиально неправильными, так как их сопротивляемость сжимающим силам ничтожна. Пришлось бы обратиться к нелинейному анализу в надежде, что удастся отследить поведение системы в закритическом состоянии, что маловероятно. Можно прибегнуть к эмпирическому алгоритму, «отключая» вручную стержни с максимальными осевыми напряжениями (не усилиями, поскольку

¹ Из-за ошибки в интерфейсе функция отображается с противоположным знаком.

устойчивость зависит и от геометрии сечения) и выполняя расчёт заново до тех пор, пока в модели не окажется сжатых гибких стержней. В принципе, для диагностики утративших несущую способность элементов можно использовать «параллельную» расчётную модель исследования на потерю устойчивости.

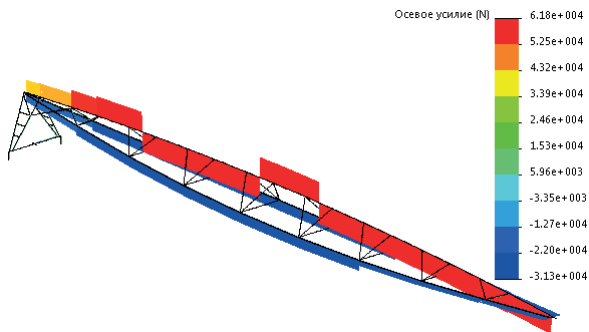


Рис. 1.17. Осевые усилия

Эпюра изгибающего момента относительно направления 2 балок (в данном случае это направление соответствует плоскости изгиба трубы) показана на рис. 1.18. Как видно, нерациональными зонами являются места опирания трубы на ближайшую к опоре ферму, а также окрестность раскоса, примыкающего к концу. Увидеть направления балок можно различными способами, персонально для балки – из свойств балки, а для всей совокупности – в диаграммах перемещений напряжений. Сделать это можно и на фоне сетки в интерфейсе команды **Создать эпюру сетки** (Create Mesh Plot), как показано на рис. 1.19. Результат дан на рис. 1.20. Обратим внимание, что под результатом относительно некоторого направления понимается действие сил в этом направлении и моментов относительно оси, соответствующей этому направлению, равно как и напряжений, порождаемых этими силами и моментами.

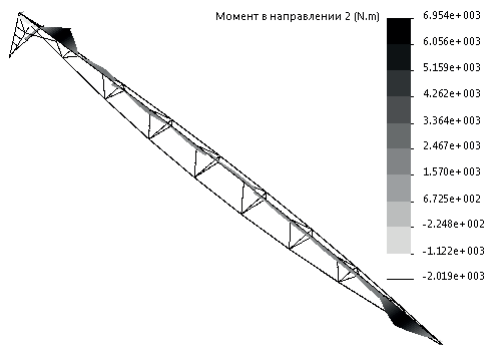


Рис. 1.18. Изгибающий момент относительно направления 2 балок

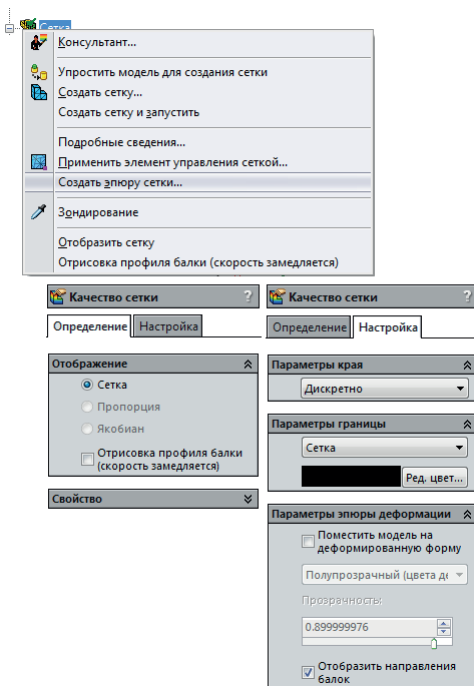


Рис. 1.19. Отображение направлений балок

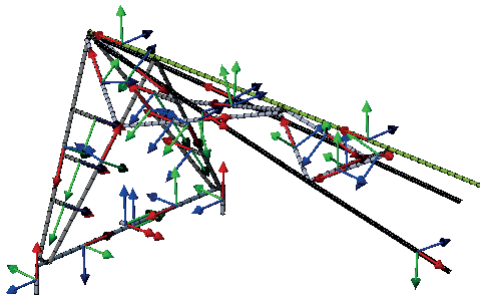


Рис. 1.20. Фрагмент модели с направлениями балок

1.4. ЧАСТОТНЫЙ АНАЛИЗ

Попытаемся установить корректность динамических моделей рам из тонких стержней с точки зрения правильности описания жёсткости. Модифицируем заделки, удаляя из них поперечные закрепления в опорах (колёсах), как пока-

зано на рис. 1.21. Эта схема, как представляется, более адекватна динамическому состоянию.

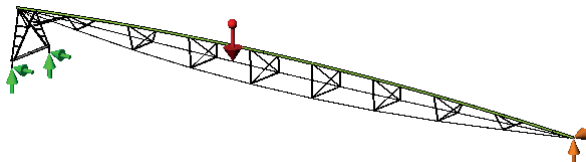


Рис. 1.21. Граничные условия

Массово-инерционные характеристики унаследованы из статического анализа – то есть труба считается заполненной водой. Скорее всего, в реальной эксплуатации многие манипуляции с оросительной системой осуществляются после слива воды, однако при тождественности нагрузок в виде перемещений, скоростей или ускорений в опорах большие нагрузки возникают в более тяжелой системе.

Отметим, что в настройках частотного анализа присутствует опция **Учёт влияния нагрузок на собственные частоты** (Use inplane effect)¹, однако по факту при попытке её включить она отключается после выхода из окна. Но в справочной системе упомянуто, что учёт влияния нагрузок осуществляется автоматически. Отметим, что в расчёте была учтена сила тяжести.

Список собственных частот приведён на рис. 1.22. Как и следовало ожидать, появилась мода движения как жёсткого целого – вращение относительно левого конца в горизонтальной плоскости (в системе координат которой определялись граничные условия) с околонулевой частотой.

Список режимов			
Название исследования: Частота с тяжестью			
Режим No.	Частотный(Рад/сек)	Частотный(Герц)	Период(Секунды)
1	0.41798	0.066523	15.032
2	4.5218	0.71966	1.3895
3	4.813	0.76601	1.3055
4	8.6424	1.3755	0.72702
5	10.661	1.6968	0.58935
6	16.22	2.5815	0.38737
7	17.168	2.7324	0.36598
8	25.584	4.0719	0.24559
9	26.497	4.2171	0.23713
10	27.459	4.3702	0.22882

Рис. 1.22. Список собственных частот

Первые три собственные формы, связанные с деформациями, показаны на рис. 1.23. Как видно, все они обусловлены низкой жёсткостью в зоне раскоса,

¹ Интерфейс зависит от версии программы.

примыкающего к опоре. А первая и третья формы – также своего рода изломом в зоне раскоса у конца фермы. В обеих зонах явно не хватает жёсткости.

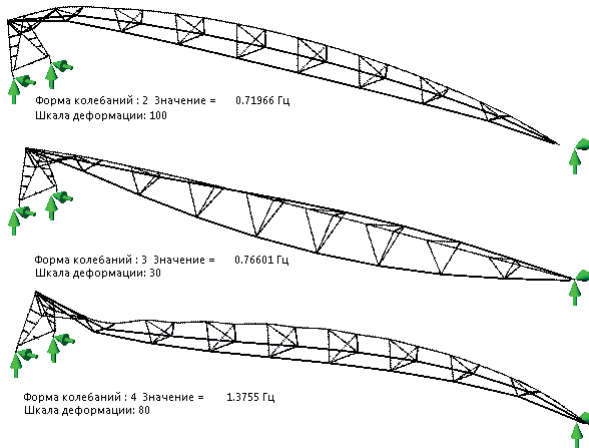


Рис. 1.23. Собственные формы и частоты

1.5. Устойчивость

Для оценки потери несущей способности через изменение формы гибких элементов создаем исследование потери устойчивости, используя схему соединений и настройки балок из модели статики. Выясняется, что первые сто собственных форм соответствуют отрицательным коэффициентам нагрузки, что означает реализацию формы при изменении направлений всех нагрузок на противоположные. Например, сотая форма показана на рис. 1.24. Инструментов принудить алгоритм выделять только моды с положительным запасом нет, а максимальное число мод ограничено 200. Проблему не решает изменение типа решателя: ни прямой, ни итерационный содержательных результатов не дают.

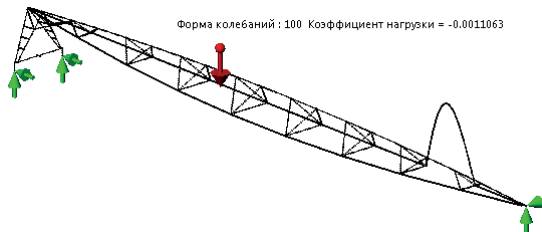


Рис. 1.24. Одна из форм потери устойчивости