

**Пузанов, Андрей Викторович.**

П88 Инженерный анализ в Autodesk Simulation Multiphysics : методическое руководство / А. В. Пузанов. — 2-е изд., эл. — 1 файл pdf : 913 с. — Москва : ДМК Пресс, 2023. — Систем. требования: Adobe Reader XI либо Adobe Digital Editions 4.5 ; экран 10". — Текст : электронный.

ISBN 978-5-89818-493-3

Книга предназначена для инженеров и конструкторов, занимающихся разработкой и моделированием машиностроительных конструкций, а также для студентов и аспирантов технических специальностей вузов.

Книга изложена в максимальном приближении к официальной справке по Autodesk Simulation и, по сути, является локализованным справочным руководством.

В книге представлены описание интерфейса, команд, настройка и принцип работы в Autodesk Simulation Multiphysics; создание, импорт/экспорт моделей, выбор типа анализа, параметров, решение задач в простой и связанной постановке; просмотр и оценка полученных результатов. Приведено описание приложений для расчета усталости и прочностного анализа емкостей.

В зависимости от степени подготовки читатель может обратиться к конкретным разделам: либо к основам и принципам работы с программным комплексом, либо непосредственно к сути и особенностям построения более сложных моделей. В книге приведены рекомендации по созданию адекватных моделей, эффективные приемы работы с программным комплексом. Рассмотрены возможные ошибки при построении модели и ее анализе, даны вероятные пути решения.

Материал книги представлен для версии Autodesk Simulation Multiphysics 2012. Таким образом, в зависимости от варианта поставки или версии отдельные меню, команды и диалоговые окна будут недоступны.

УДК 62-11004.9Autodesk Simulation Multiphysics

ББК 30.4-02с515

**Электронное издание на основе печатного издания:** Инженерный анализ в Autodesk Simulation Multiphysics : методическое руководство / А. В. Пузанов. — Москва : ДМК Пресс, 2013. — 912 с. — ISBN 978-5-94074-693-5. — Текст : непосредственный.

Все права защищены. Любая часть этой книги не может быть воспроизведена в какой бы то ни было форме и какими бы то ни было средствами без письменного разрешения владельцев авторских прав.

Материал, изложенный в данной книге, многократно проверен. Но поскольку вероятность технических ошибок все равно существует, издательство не может гарантировать абсолютную точность и правильность приводимых сведений. В связи с этим издательство не несет ответственности за возможные ошибки, связанные с использованием книги.

В соответствии со ст. 1299 и 1301 ГК РФ при устранении ограничений, установленных техническими средствами защиты авторских прав, правообладатель вправе требовать от нарушителя возмещения убытков или выплаты компенсации.

ISBN 978-5-89818-493-3

© Пузанов А. В., 2012

© Оформление, издание, ДМК Пресс, 2012

# Содержание

<b>Autodesk Simulation – место в структуре цифрового прототипа от Autodesk .....</b>	<b>21</b>
<b>Системные требования .....</b>	<b>22</b>
<b>Введение.....</b>	<b>23</b>
<b>Основы Autodesk Simulation .....</b>	<b>24</b>
Запуск Autodesk Simulation .....	25
Интерфейс пользователя .....	25
Команды навигации .....	27
Настройка отображения видового куба .....	27
Использование компаса.....	28
Наклонить вид грани .....	29
Переключиться на соседнюю грань .....	29
Вид спереди .....	30
Обзор штурвалов .....	31
Уведомление о неактивном штурвале .....	32
Отображение и использование штурвалов .....	32
Управление отображением штурвалов .....	33
Подсказки для штурвалов и информация об инструментах .....	33
Панель навигации .....	33
Доступные инструменты навигации .....	34
Изменение положения и ориентации панели навигации.....	34
Управление отображением инструментов навигации на панели навигации .....	35
Виды моделей.....	35
Инфоцентр.....	37
Меню .....	37
Основные свойства и параметры .....	40
Диалоговые окна.....	40
Закладка Analysis .....	40
Закладка CAD Import .....	42

Закладка FEA Editor .....	44
Закладка General Information .....	44
Закладка Graphics .....	44
Закладка Mesh-FEM File interface .....	46
Закладка Mouse Option .....	47
Закладка Reporting.....	47
Закладка Results .....	47
Закладка Sketching .....	47
Закладка View Option.....	48
Панель быстрого доступа .....	48
Закладка Настройки выбора .....	49
Закладка настройки просмотра .....	54
Закладка настройки инструментария .....	58
Закладка настройки горячих клавиш .....	59
Системные единицы .....	61
Утилита конвертирования базы данных.....	65
Калькулятор размеров и центра тяжести.....	67
Импорт файлов моделей.....	69
Введение .....	69
Загрузка моделей Autodesk Simulation .....	69
Загрузка модели .....	69
Загрузка унаследованных моделей .....	70
Импорт CAD-файлов .....	70
Работа локально .....	70
Импорт твердотельных моделей из CAD-программы .....	72
Импорт файлов с использованием Autodesk Simulation с установленной CAD-надстройкой .....	72
Импорт файлов с использованием Alibre Design.....	73
Импорт файлов с использованием Autodesk Inventor.....	73
Импорт файлов с использованием Autodesk Inventor Fusion ....	73
Импорт файлов с использованием Autodesk Mechanical Desktop .....	74
Импорт файлов с использованием CoCreate OneSpace Modeling .....	74
Импорт файлов с использованием IronCAD .....	74
Импорт файлов с использованием KeyCreator .....	75
Импорт файлов с использованием Pro/ENGINEER.....	75
Импорт файлов с использованием Rhinoceros .....	75
Импорт файлов с использованием Solid Edge .....	75

Импорт файлов с использованием SolidWorks .....	76
Импорт файлов с использованием SpaceClaim .....	76
Ассоциативность между CAD и Autodesk Simulation .....	77
Упрощение моделей .....	78
Импорт моделей без использования CAD-приложений .....	81
Импорт файлов .....	82
Сшивание поверхностей .....	83
Импорт каркасных CAD-файлов .....	84
Импорт каркасных файлов AutoCAD DXF/DWG .....	84
Импорт каркасных IGES-файлов .....	86
Импорт/экспорт CAE-файлов .....	87
Архивы .....	88
Создание .....	88
Загрузка .....	89
Управление .....	89
Восстановление .....	89
Удаление .....	89
Загрузка моделей с компакт-диска .....	90
Конечно-элементные модели .....	90
Обзор разбиения модели на конечные элементы .....	90
Разбиение на конечные элементы твердотельных CAD-моделей .....	91
Основные принципы .....	91
Общие замечания .....	93
Размер конечно-элементной сети .....	93
Контакт и соответствие КЭ-сети между деталями .....	94
Разбиение на конечные элементы твердотельных моделей .....	95
Тонкостенные детали .....	95
Анализ потока жидкости и анализ мультифизики .....	95
Материалы уплотнений (прокладки) .....	96
Параметры настройки КЭ-сети модели .....	96
Проблемы водонепроницаемости в КЭ-сетях .....	125
Соответствие конструктивных особенностей .....	127
Объединение компонентов .....	129
Болты и другие крепления .....	132
Точки усовершенствования .....	137
Конструктивные вершины – узловые точки .....	140
Генерация жидкости .....	141
Изучение КЭ-сети .....	142

Создание и редактирование модели .....	145
Плоскость рисования .....	145
Добавление геометрии .....	149
Добавление новой детали в модель .....	150
Добавление конструктивных узлов в модель .....	150
Добавление линий в модель.....	151
Изменение геометрии.....	156
Запрос (справка) .....	166
Утилиты .....	167
Изменение параметров Autodesk Inventor .....	169
Генерация сети моделей, созданных вручную .....	169
Усовершенствование сети поверхности .....	182
Кнопка Options .....	183
Контактные пары .....	189
Типы контакта .....	192
Функция силового соединения.....	195
Предупреждение по использованию силового соединения.....	197
Примечание силового соединения.....	197
Пример теплового контакта .....	206
<b>Типы анализа .....</b>	<b>208</b>
Какой анализ применить?.....	209
Линейный.....	209
Нелинейный .....	210
Тепловой .....	211
Поток жидкости .....	212
Электростатический .....	212
Массопередача .....	213
Мультифизика .....	213
Установка типа анализа.....	214
Мультифизика .....	214
Сравнение связанных и несвязанных исследований.....	215
Преимущества связанного анализа.....	215
Преимущества несвязанного анализа .....	215
Линейный анализ .....	217
Статическое напряжение с линейными моделями материалов .....	217
Собственная (модальная) частота .....	218

Собственная (модальная) частота с приложением нагрузки.....	219
Переходный процесс .....	219
Спектр отклика.....	221
Случайная вибрация .....	222
Частотный отклик .....	224
Критическая нагрузка устойчивости.....	225
Метод динамического проектирования (DDAM) .....	228
Нелинейный анализ.....	230
Нелинейное конструктивное моделирование механических событий (MES) .....	230
Теоретические основы моделирования событий.....	231
Схема моделирования событий .....	235
Собственная частота – модальный анализ с нелинейными моделями материалов .....	238
Совместимость моделей.....	238
Тепловой анализ .....	239
Установившаяся теплопередача.....	240
Линейный установившийся анализ теплопередачи .....	240
Нелинейный установившийся анализ теплопередачи .....	241
Нестационарный теплообмен.....	245
Линейный анализ переходного процесса теплопередачи.....	246
Нелинейный анализ переходного процесса теплопередачи.....	247
Анализ течения жидкости .....	247
Стационарное течение жидкости .....	248
Нестационарное течение жидкости .....	249
Течение жидкости через пористый материал .....	249
Течение жидкости в открытом канале .....	250
Рассмотрение моделирования.....	251
Теоретические основы течения жидкости.....	257
Уравнения Навье-Стокса для несжимаемого потока жидкости.....	257
Метод конечных элементов и несжимаемые потоки .....	258
Описание задачи .....	259
Метод пенальти .....	262
Дискретизированные уравнения.....	263
Электростатический анализ .....	265

Основные уравнения для исследований электростатики .....	265
Электростатический ток и напряжение .....	266
Электростатическое поле и напряжение .....	266
Анализ усталости .....	267
Массопередача .....	267
<b>Настройка и выполнение анализа .....</b>	<b>269</b>
Сценарии проекта моделей .....	270
Работа со сценариями проекта .....	272
Среда Редактора FEA .....	274
Разные функции (видимость, подавление, копия и вставка) .....	274
Выбор типа элемента .....	276
Определение параметров элемента .....	276
Определение свойств материалов .....	276
Использование нагрузок и ограничений (граничных условий) ...	278
Определение направления нагрузки .....	279
Группировка нагрузок и ограничений .....	279
Назначение нагрузки / ограничения группе .....	280
Добавление или исключение группы в анализ .....	280
Изменения элементов в группе .....	281
Определение параметров исследований .....	281
Симметрия модели .....	281
Мультифизика – использование результатов в других исследованиях .....	282
Требования для сетей различного размера .....	283
Требования идентичности сетей .....	285
Локальные системы координат .....	286
Создание системы координат .....	287
Назначение узлов системе координат .....	287
Назначение нагрузок и ограничений локальным системам координат .....	288
Представление результатов в системе координат .....	290
Линейный анализ .....	291
Тип элементов и параметры .....	291
Балочные элементы .....	291
Промежуточные элементы .....	301
Жесткие элементы .....	304
Элементы пружины .....	306

Элементы связки .....	308
2D-элементы .....	310
Мембранные элементы .....	315
Элементы пластины .....	320
Толстостенные составные (композитные) элементы .....	326
Тонкие составные элементы .....	334
Тетраэдральные (кирпичные) элементы .....	342
Четырехгранные (тетраэдрические) элементы .....	346
Несовместимые режимы деформации .....	348
Свойства материалов .....	349
Изотропные свойства материалов .....	349
Ортотропные свойства материала .....	350
Температурно зависимые свойства материалов .....	352
Свойства композитных материалов .....	352
Свойства пьезоэлектрических материалов .....	356
Свойства анизотропных материалов .....	357
Нагрузки и закрепления .....	358
Гравитация или ускорение .....	358
Предварительная нагрузка балки .....	359
Центробежная нагрузка .....	362
Распределенные нагрузки .....	364
Силы .....	364
Гидростатическое давление .....	367
Нагрузки из файла .....	370
Сосредоточенные массы .....	370
Моменты .....	371
Давление или растяжение .....	372
Внешние нагрузки .....	373
Температура .....	376
Переменные нагрузки .....	379
Электрическое напряжение .....	383
Общие ограничения – граничные условия .....	384
Ограничение штифт .....	385
Циклическая симметрия .....	386
Предопределенная деформация – элемент перемещения границ .....	389
Одномерная пружина – упругий граничный элемент .....	390
Разъединение концов .....	390
Многоточечные ограничения .....	392



Смещения.....	394
3D-пружины – жесткие граничные элементы.....	395
Параметры анализа .....	397
Статический анализ напряжений с линейными моделями материалов.....	397
Собственная частота – модальный анализ .....	405
Анализ собственной частоты с преднапряжением.....	409
Спектр отклика.....	412
Анализ случайных вибраций.....	417
Анализ частотного отклика.....	418
Анализ переходного процесса напряжений – прямое интегрирование.....	422
Анализ переходного процесса напряжений – модальная суперпозиция .....	426
Критическая нагрузка устойчивости.....	428
Метод динамического проектирования (DDAM) .....	431
Нелинейный анализ.....	435
Тип элементов и параметры .....	435
Линейные элементы.....	435
Элементы привода.....	435
Балочные элементы .....	438
Элементы контакта .....	449
Элементы связи .....	450
Элементы демпфирования .....	451
Универсальный элемент контакта .....	451
Элементы шкива .....	454
Элементы трубы .....	456
Элементы слайдера.....	459
Элементы пружины.....	460
Элементы связи .....	462
Плоские элементы .....	464
2D-элементы .....	464
Мембранные элементы.....	479
Элементы оболочки .....	488
Твердотельные элементы.....	502
Элементы прокладки 3D .....	502
3D-гидродинамические элементы .....	505
3D-кинематические элементы .....	506
Тетраэдральные (кирпичные) элементы.....	507

Четырехгранные (тетраэдрические) элементы.....	519
Формулировки исследований .....	529
Свойства материалов.....	530
Материал Arruda-Boyce (Арруда-Бойс) .....	531
Материал Blatz-Ko (Блатц-Ко) .....	531
Композитные материалы .....	531
График зависимости свойств материала .....	536
График зависимости свойств материала с исключением.....	538
Разрушаемый материал.....	538
Материал Drucker-Prager (Друкер-Прагер) .....	539
Материал Duncan-Chang (Дункан-Чанг) .....	540
Материал прокладки.....	542
Гидродинамические материалы.....	545
Гиперпена.....	545
Изотропные материалы .....	546
Линейные вязкоупругие материалы .....	547
Материал Mooney-Rivlin (Муни-Ривлин) .....	548
Ортотропные материалы .....	550
Пьезоэлектрические материалы .....	551
Железобетон .....	552
Температурно зависимые материалы .....	555
Тепловая ползучесть вязкоупругих материалов .....	556
Материал Van der Waals (Ван дер Ваалса) .....	557
Геологические материалы.....	558
Вязкоупругий материал .....	559
Кривые материала Мизеса .....	559
Материал Мизеса .....	560
Материал Yeoh (Еох).....	563
Аппроксимация кривой .....	563
Нагрузки и закрепления .....	571
Редактор кривой нагрузки.....	573
Предварительные нагрузки балки .....	574
Распределенные нагрузки .....	575
Силы .....	576
Гравитация или ускорение .....	578
Гидростатическое давление.....	579
Начальная скорость .....	582
Нагрузки из файла .....	582

Сосредоточенные массы .....	582
Моменты.....	583
Предопределенное перемещение .....	584
Давление или растяжение.....	586
Исследования (проба) .....	588
Внешние нагрузки.....	589
Температура .....	591
Переменные нагрузки .....	593
Электрическое напряжение .....	595
Общие ограничения – граничные условия .....	596
Ограничение штифт .....	597
Разъединение концов .....	598
Плоскости воздействия.....	599
Смещения.....	600
Контакт поверхность к поверхности .....	601
Параметры анализа .....	603
Моделирование механических событий .....	603
Моделирование статических напряжений с нелинейными моделями материалов.....	604
MES Рикс – постдеформация .....	605
Анализ собственной частоты с нелинейными моделями материалов.....	607
Определение кривой нагрузки .....	608
Контроль вывода результатов .....	613
Дополнительные параметры настройки .....	614
Метод равновесия .....	614
Контроль сходимости .....	616
Методы интегрирования .....	620
Контроль размера шага по времени.....	622
Выполнение рестарта анализа.....	624
Применение демпфирования Рэлея.....	628
Определение центробежных нагрузок .....	629
Контроль выходных файлов .....	630
Опции решателя .....	631
Тепловой анализ .....	633
Тип элементов и параметры .....	633
Линейные элементы.....	633
Стержневые элементы.....	633
Плоские элементы .....	634

2D-элементы .....	634
Элементы пластины .....	638
Твердотельные элементы.....	641
Кирпичные элементы .....	641
Тетраэдрические элементы .....	645
Свойства материалов.....	648
Изотропные свойства материалов .....	648
Ортотропные свойства материала .....	648
Температурно зависимые свойства материалов .....	649
Изотропные свойства материала переменного фазового состояния .....	650
Нагрузки и закрепления .....	652
Редактор кривой нагрузки.....	653
Применение температуры.....	655
Радиация от тела к телу.....	656
Конвекция.....	661
Конвекция жидкости .....	663
Поток теплоты или источник.....	665
Генерация внутренней теплоты .....	665
Радиация .....	666
Температура .....	668
Нагрузки из файла .....	669
Параметры анализа .....	669
Установившаяся теплопередача .....	669
Переходный процесс теплопередачи .....	676
Анализ течения жидкости .....	688
Тип элементов и параметры .....	688
Плоские элементы .....	688
2D-элементы .....	688
Твердотельные элементы.....	693
3D-элементы .....	693
Свойства материалов.....	698
Свойства материала ньютоновской жидкости .....	698
Свойства материала Power Law (закона мощности) .....	699
Свойства материала Carreau (Карпео) .....	701
Свойства пористых материалов .....	702
Свойства изотропных материалов .....	703
Свойства ортотропных материалов.....	704
Свойства материала жидкости.....	704

Нагрузки и закрепления .....	704
Редактор кривой нагрузки.....	705
Силы плавучести.....	707
Поверхности вентилятора .....	708
Гравитация или ускорение .....	710
Начальные объемы жидкости .....	710
Предопределенные отверстия входа и выхода.....	712
Предопределенные скорости.....	712
Предопределенные условия турбулентности .....	718
Предопределенная шероховатость стенки.....	719
Давления и растяжения.....	720
Относительное вращение конструкций .....	722
Параметры анализа .....	727
Стационарный или нестационарный поток жидкости .....	727
Кривые нагрузок .....	727
Опции формулировки .....	732
Варианты турбулентности.....	736
Опции решателя .....	738
Управление данными в выходных текстовых файлах .....	741
Рестарт анализа .....	742
Дополнительные опции решателя.....	743
Поток через пористые материалы .....	745
Электростатический анализ .....	746
Тип элементов и параметры .....	746
Плоские элементы .....	746
2D-элементы .....	746
Твердотельные элементы.....	749
Кирпичные элементы.....	749
Тетраэдрические элементы .....	750
Свойства материалов.....	752
Изотропные свойства материалов .....	752
Ортотропные свойства материала .....	752
Температурно зависимые свойства материалов .....	753
Нагрузки и закрепления .....	753
Приложенное электронапряжение .....	754
Заряд.....	755
Ток .....	755
Температура .....	755
Параметры анализа .....	757

Электростатический ток и электронапряжение .....	757
Сила электростатического поля и электронапряжения.....	760
Массопередача .....	765
Тип элементов и параметры .....	765
Нагрузки и закрепления .....	766
Концентрация .....	767
Начальные концентрации.....	768
Источники массы .....	768
Параметры анализа .....	769
Кривые нагрузок .....	769
Управление данными в выходных текстовых файлах .....	772
Рестарт анализа.....	773
Параметры анализа мультифизики.....	773
Параметры связанного стационарного анализа теплового и потока жидкости.....	774
Основная позиция табуляции связанного стационарного анализа.....	774
Дополнительная позиция табуляции связанного стационарного анализа.....	777
Параметры связанного переходного процесса анализа теплового и потока жидкости .....	778
Основная позиция табуляции связанного анализа переходного процесса .....	779
Дополнительная позиция табуляции связанного анализа переходного процесса .....	782
Управление библиотекой материалов .....	783
Нагрузки из других файлов .....	784
Решатели в конечно-элементном анализе.....	786
Выполнение анализа – запуск моделирования .....	790
Запланированный анализ .....	793
Выполнение линейных исследований .....	795
Выполнение нелинейных исследований.....	796
Выполнение тепловых исследований .....	797
Выполнение исследований потока жидкости .....	798
Выполнение исследований массопередачи .....	798
Выполнение исследований мультифизики .....	798
Сообщения об ошибках ФОРТРАНа.....	798
Оптимизация конструкции .....	798
Конструктивные переменные .....	800

Цели и ограничения .....	802
Расширения файлов.....	803
<b>Результаты .....</b>	<b>806</b>
Среда Результатов .....	807
Экспорт результатов .....	810
Меню Результаты .....	811
Меню результатов линейного анализа .....	811
Меню результатов нелинейного анализа.....	822
Меню результатов теплового анализа .....	825
Меню результатов электростатического анализа .....	826
Меню результатов анализа потока жидкости.....	829
Меню результатов анализа массопередачи .....	833
Меню результатов мультифизики.....	834
Опции результатов .....	834
Опции отображения .....	842
Меню Утилиты .....	847
Линеаризация напряжения .....	847
Инструментальная панель.....	848
Область графика.....	851
Контроль линеаризации.....	852
Комбинации нагрузок .....	853
Анализ разрушений.....	855
Графические результаты анализа.....	862
Отчеты HTML.....	869
Настройка отчета .....	869
Сохранение отчетов .....	873
Визуализация анимации .....	874
<b>Приложение .....</b>	<b>877</b>
Примеры .....	877
Мастер расчета усталости Autodesk Fatigue .....	877
Шаг 1 .....	879
Шаг 2 .....	879
Шаг 3 .....	885
Шаг 4 .....	887
Шаг 5 .....	890
Шаг 6 .....	891

Содержание	19
Шаг 7 .....	894
Визуализатор .....	896
Генератор отчета .....	900
Приложение PVDesigner .....	901
<b>Изменения в версии Autodesk Simulation 2013</b>	
<b>(март 2012)</b> .....	905