

Разработанная вычислительная модель динамического взаимодействия сооружения с грунтом применена для оценки сейсмостойкости подземных трубопроводов, примыкающих к ответственным сооружениям АЭС Бушер (Иран), Нововоронежской АЭС-2, Калининской, Ростовской АЭС (Россия), Белорусской АЭС (Белоруссия) по заказу ОАО «НИАЭП» (Н. Новгород).

Исследование выполнено в НИИМ ННГУ при поддержке гранта Президента РФ для поддержки ведущих научных школ РФ НШ-593.2014.8, гранта Министерства образования и науки (соглашение от 27.08.2013 № 02.В.49.21.0003 между МОН РФ и ННГУ) и Российского фонда фундаментальных исследований (№ 14-01-31113, № 14-08-01129).

Литература

1. Бирбраер А. Н., Шульман С. Г. Прочность и надежность конструкций АЭС при особых динамических воздействиях. М.: Энергоатомиздат, 1989.
2. Jarernprasert S., Bazan-Zurita E., Bielak J. Seismic soil-structure interaction response of inelastic structures // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. 2013. 47. P. 132–143.
3. Nakhaei M., Ghannad M. A. The effect of soil-structure interaction on damage index of buildings // Engineering Structures. 2008. 30. P. 1491–1499.
4. Дюкина Н. С., Баженов В. Г. Методы численного исследования сейсмостойкости заглубленных сооружений. Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG, 2012.
5. Баженов В. Г., Чекмарев Д. Т. Решение задач нестационарной динамики пластин и оболочек вариационно-разностным методом. Н. Новгород: Изд-во ННГУ, 2000.
6. Дюкина Н. С., Кибец А. И., Жестков М. Н. Анализ сейсмических колебаний заглубленных сооружений с учетом трансверсально-изотропного основания // Проблемы прочности и пластичности. 2013. Вып. 75. Ч. 1. С. 40–46.
7. Воеводин В. В., Воеводин Вл. В. Параллельные вычисления. С.-Пб.: БХВ-Петербург, 2002.
8. Баженов В. Г., Гордиенко А. В., Кибец А. И. и др. Адаптация последовательной методики решения нелинейных задач динамики конструкций для многопроцессорных ЭВМ // Высокопроизводительные параллельные вычисления на кластерных системах: мат. докл. Самара, 30 сентября – 2 октября 2004. С. 20–25.
9. Баженов В. Г., Дюкина Н. С. Численное исследование взаимодействия сооружений с грунтовым основанием при сейсмических воздействиях // Вычислительная механика сплошных сред. 2012. Т. 5, № 1. С. 19–24.

ПАКЕТ ПРОГРАММ ЛОГОС.

МЕТОД РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ СТАТИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ ТОНКОСТЕННЫХ И СТЕРЖНЕВЫХ КОНСТРУКЦИЙ НА ОСНОВЕ SOLID-SHELL ТЕХНОЛОГИИ

Р. А. Барабанов, Д. Ю. Дьянов, И. И. Каныгин, Е. А. Филимонкин, К. В. Циберева

Российский федеральный ядерный центр –
Всероссийский НИИ экспериментальной физики, г. Саров

Введение

В настоящее время во ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» разрабатывается пакет программ ЛОГОС для решения широкого круга задач, в том числе механики деформируемого твердого тела на много-

процессорных вычислительных ресурсах [1–2]. Одной из составных частей данного пакета программ является модуль решения задач расчета напряженно-деформированного состояния (НДС) конструкций при квазистатических термосиловых воздействиях, основанный на методе конечных элементов (Модуль ЛОГОС-Прочность). Статический анализ применяется для задач, в которых действие сил инерции или процессы рассеяния энергии не оказывают существенного влияния на поведение конструкции. Необходимость решения задач указанного класса актуальна для многих отраслей промышленности.

Многие практически важные инженерные задачи являются нелинейными. Однако стоит отметить, что реализация оболочечных и балочных элементов в ЛОГОС-Прочность обеспечивает моделирование процессов статического деформирования без возможности учета геометрической нелинейности. Для удовлетворения потребностей пользователей продукта (в частности, ОАО «ОКБ Сухоного») был необходим функционал, обеспечивающий проведение расчетов КЭ-моделей с учетом геометрической нелинейности, содержащих структурные (оболочечные и балочные) элементы. По оценкам разработчиков ЛОГОС-Прочность, адаптация структурных элементов под возможности нелинейного деформирования (учет геометрической нелинейностей, контактные алгоритмы) заняла бы существенное время в силу сложности алгоритмов. Кроме того, в таком случае существовала бы необходимость реализации нескольких различных типов конечно-элементных аппроксимаций для обеспечения согласованности с реализациями из различных коммерческих пакетов, что еще повысило бы трудозатраты. Поэтому в качестве относительно быстрого решения, которое могло обеспечить возможность проведения нелинейных расчетов оболочечных и балочных моделей, была выбрана так называемая Solid-Shell методология восполнения структурных двумерных и одномерных элементов до объемных элементов сплошной среды.

Идея конечно-элементного моделирования тонкостенных оболочечных конструкций с использованием либо гибридных оболочечно-объемных теорий (hybridsolid-shellapproach), либо с использованием теории чисто объемных тел (pure-solidformulation), активно развивается с начала 2000-х годов [3]–[7]. К разработке и реализации в рамках ЛОГОС-Прочность был выбран второй подход моделирования оболочечных конструкций с использованием трехмерных элементов сплошной среды. Для простоты изложения в дальнейшем реализуемый в рамках ЛОГОС-Прочность подход будем называть Solid-Shell технологией (подходом, методологией).

Определяющим фактором для начала работ по программной реализации Solid-Shell методологии в пакете ЛОГОС-Прочность явилось то, что в текущей реализации объемных элементов развит и достаточно хорошо оттестирован функционал для проведения нелинейных расчетов с учетом материальной, геометрической нелинейностей и контактного взаимодействия. Основываясь на публикациях по реализации Solid-Shell методологии [7, 8], можно было надеяться, что реализованные для объемных элементов алгоритмы учета нелинейностей могут быть достаточно легко и в приемлемые сроки адаптированы под оболочечные и балочные структурные элементы.

При использовании Solid-Shell подхода легкость постановки модели сохраняется за счет описания геометрии двумерными/одномерными конечными элементами, сетка из которых натянута на криволинейную поверхность. Однако вместо введения вращательных степеней свободы, как это предполагается в чисто оболочечном подходе, оболочечные элементы расширяются до одного слоя объемных элементов сплошной среды. Достоинством реализации является то, что все процедуры расширения до объемных элементов и обратного восполнения до исходных оболочечных и балочных элементов осуществляются внутри программного кода и скрыты от пользователя, которому не требуется никаких дополнительных операций по модификации исходной двумерной сетки. Кроме того, набор реализованных процедур расширения плоской сеточной топологии до сетки из объемных элементов может быть повторно использован в других программных модулях ЛОГОС-Прочность – разработчикам видится востребованность реализованного кода в программах визуализации сетки, а также в контактных алгоритмах нахождения взаимопроникновения контактирующих поверхностей.

1. Реализация Solid-Shell методологии в программном комплексе ЛОГОС

Методология расширения оболочечных элементов до объемных элементов сплошной среды такова. Расширение заключается в построении на основе исходной двумерной модели трехмерной неразрывной модели сплошной среды, при этом особым образом моделируются острые углы и другие изгибные участки геометрии, где касательная к поверхности терпит разрыв или толщина оболочек становится разрывной. В этих особенных участках все наборы дополнительных вершин объемной сетки, образованных расширением одной и той же исходной оболочечной вершины, полагаются связанными в единое жесткое тело. Такие условия жесткой связи формулируются в виде дополнительного набора многоточечных ограничений. Подобные наборы дополнительно сгенерированных точек трехмерного тела, соединенных условиями жесткой связи, в англоязычных источниках называются узлами (knots). Степени свободы каждого набора жестких связей, т. е. узла, разделяются на поступательные и вращательные, как в классической теории оболочек. Все соответствующие структуры, определенные в постановке модели для исходной вершины оболочечной сетки (граничные условия, закрепления, узловые связи), расширяются до набора структур, заданных в вершинах трехмерной сетки.

Программная реализация методологии расширения оболочечных элементов до объемных элементов сплошной среды сводится к следующим основным процедурам:

- определение и подсчет числа разнонаправленных нормалей для каждой вершины оболочечного элемента (в дальнейшем каждый набор этих узловых нормалей используется для формирования узла – набора вершин трехмерной сетки, объединенных условиями жесткой связи);
- добавление набора виртуальных вершин для каждой вершины исходной оболочечной сетки (по 3 узла для каждой из узловых нормалей – первый узел совпадает с исходной оболочечной вершиной, и по одному узлу вверх и вниз по направлению нормали на расстояние в толщину оболочки);
- построение набора объемных элементов сплошной среды на основе наборов виртуальных вершин;
- смена признаков счетности для вершин и элементов – вершины и элементы исходной оболочечной сетки объявляются несчетными, виртуальные вершины и элементы сплошной среды полагаются обсчитываемыми;
- расширение начальных и граничных условий, исходно определенных на оболочечных структурах, на структуры виртуальной объемной сетки;
- формирование узлов – дополнительных наборов вершин с поступательными и вращательными степенями свободы, и дополнительного набора многоточечных соединений, выражающих условие перемещения как жесткого тела для каждого набора виртуальных вершин;
- формирование матрично-векторных структур на основе модифицированной сеточной топологии, и решение глобальной системы, определенной на сетке из объемных элементов;
- пересчет результирующих данных, определяющих НДС, с виртуальных вершин и элементов трехмерной сетки на исходные вершины и элементы двумерной оболочечной сетки.

Далее приведены детали ключевых пунктов реализации.

1.1. Расширение сеточной топологии

На рис. 1.1–1.2 представлены схемы соответствия узлов исходных одномерного (балка) и двумерного (оболочка) элементов узлам генерируемого трехмерного элемента. Схемы приведены как для линейных, так и для квадратичных элементов. Отметим, что текущая реализация в ЛОГОС-Прочность предполагает построение линейных объемных элементов, однако в коде предусмотрена возможность выбора первого или второго порядка интегрирования получаемых объемных элементов.

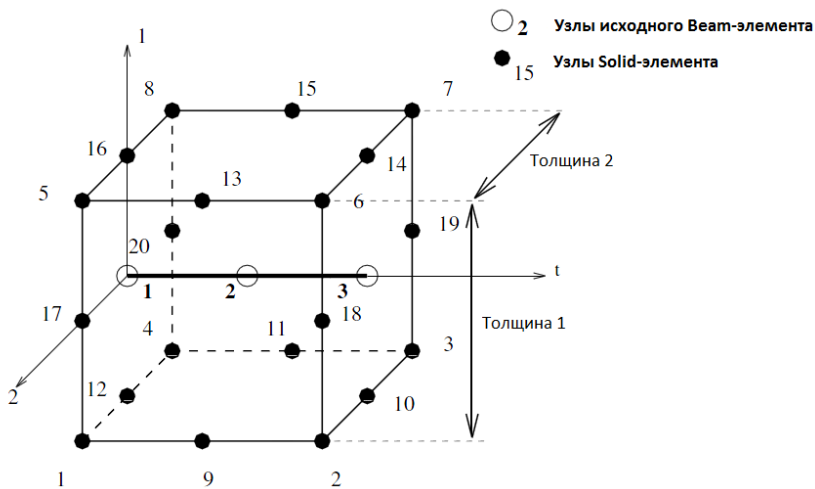


Рис. 1.1. Расширение балочного элемента

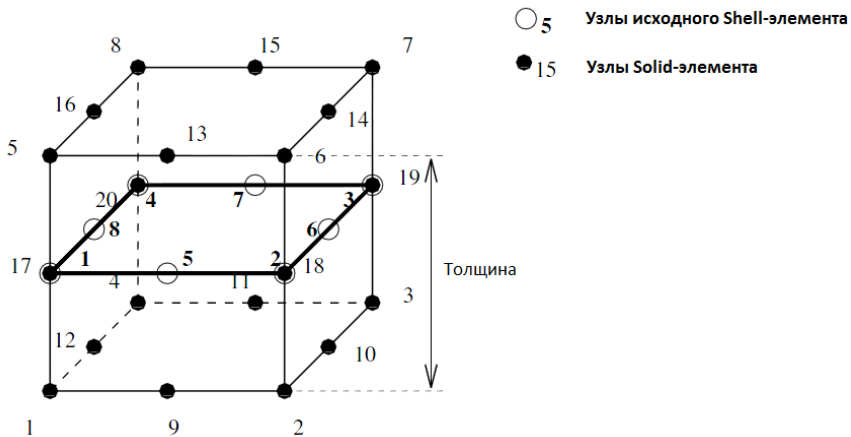


Рис. 1.2. Расширение оболочечного элемента

Локальные оси 1 и 2 определяют нормали в поперечном сечении балочного элемента, по которым строятся вершины генерируемого объемного элемента. Эти локальные оси и нормали определяются из исходных данных конечно-элементной модели. Толщины 1 и 2, по которым определяются координаты генерируемых вершин в направлении нормалей, также определяются по исходным данным – площади поперечного сечения и/или моментам инерции. Так, для балки с прямо-

угольным сечением толщины сечения определяются из соотношений

$$\begin{cases} I_{yy} = \frac{bh^3}{12}, \\ I_{zz} = \frac{hb^3}{12}, \end{cases} \text{ где } I_{xx} \text{ и } I_{yy} - \text{за-}$$

данные моменты инерции, b и h – искомые толщина 1 и толщина 2 из рис. 1.1.

Отметим, что такая реализация Solid-Shell методологии для балочных элементов ориентирована на балочные элементы с прямоугольным поперечным сечением. Реализация балок с другими формами поперечного сечения потребует введения дополнительных условий и модификаций в конечно-элементные аппроксимации объемных элементов.

Расширение оболочечного элемента до объемного ведется по аналогичной схеме с использованием исходных данных о срединной поверхности оболочки и толщине оболочки. Срединная по-

верхность оболочки, заданная тремя или четырьмя вершинами (в случае треугольной или четырехугольной оболочки), определяет узловые нормали к каждой из 4 исходных вершин. Вершины генерируемого объемного элемента строятся в направлении узловых нормалей вверх и вниз на расстояние половины толщины оболочки.

Фрагмент построенной объемной сетки реальной модели (расчет НДС трубопровода) приведен на рис. 1.3. При отображении оболочечной сетки объемными элементами становятся видны зоны сочленений и разнотолщинность отдельных участков геометрии, которые не могут быть заметны при отображении плоскими элементами. По этой причине реализованный функционал отображения плоских объектов объемными элементами является полезным и востребованным на стадии подготовки расчетных данных и описания сеточной геометрии – пользователь наглядно видит возможные нестыковки сеток и ошибки в задании толщин плоских или линейных элементов. На текущий момент опция отображения объемными элементами реализована в ЛОГОС-Прочность для сохранения результатов счета в D3PLOT-формате, а также по запросу разработчиков введена в последние версии программы ЛОГОС-ПреПост.

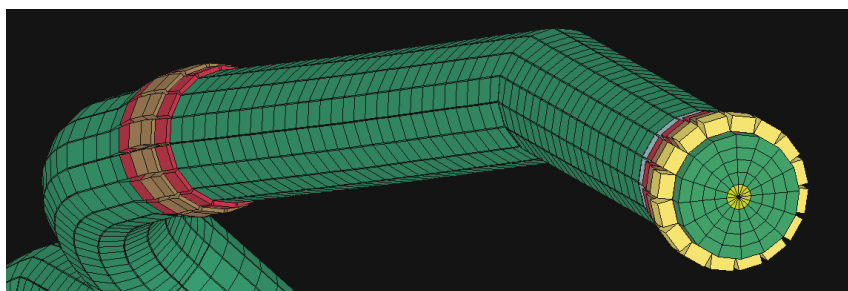


Рис. 1.3. Результат построения объемной сетки на основе исходной оболочечной модели

1.2. Моделирование «узлов» – особых зон с разрывом нормалей или толщин

До тех пор пока конечно-элементная сетка из оболочек или балок остается гладкой, расширение исходной плоской или одномерной сетки приведет к построению связанной неразрывной трехмерной конечно-элементной сетки. Однако, когда возникает необходимость моделирования углов, сильных изгибов, сочленений, т. е. зон, где пересекаются несколько балок или оболочек, или толщина балок/оболочек терпит разрыв, возникает проблема построения связанной трехмерной сетки. На рис. 1.4–1.5 показаны типичные случаи таких особых зон, в которых нормали/толщины претерпевают разрывы. В реализуемой Solid-Shell терминологии сеточные вершины, образующие такие разрывные зоны, называются «узлами» («knots» в англоязычной литературе). Далее по тексту понятия «узел» и «вершина» будут разделяться – понятие «вершина» будет обозначать вершину конечного элемента (т. е. узел пространственной сетки), а понятие «узел» будет обозначать вершину в зоне пересечения балок/оболочек с разрывом в направлении нормали или с разрывом толщины.

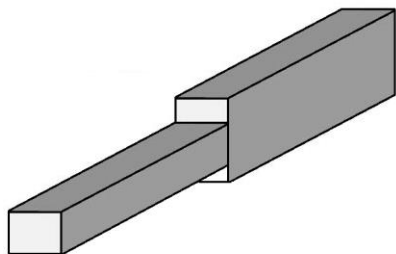


Рис. 1.4. Толщина в узле терпит разрыв

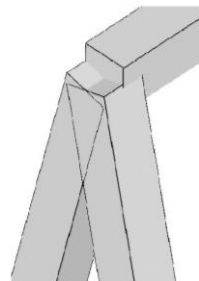


Рис. 1.5. Узел содержит несколько разнонаправленных нормалей

В зонах узлов генерируемая трехмерная сетка из объемных элементов частично перекрывается; элементы этой сетки не связаны друг с другом посредством одинаковых вершин. Для обеспечения связи между объемными элементами набор сгенерированных вершин в узловых зонах рассматривается движущимся как единое жесткое тело; определяющей вершиной полагается вершина исходной оболочечной/балочной сетки. На рис. 1.6 приведена иллюстрация узла и набора связей, определяющих движение узла как жесткого тела.

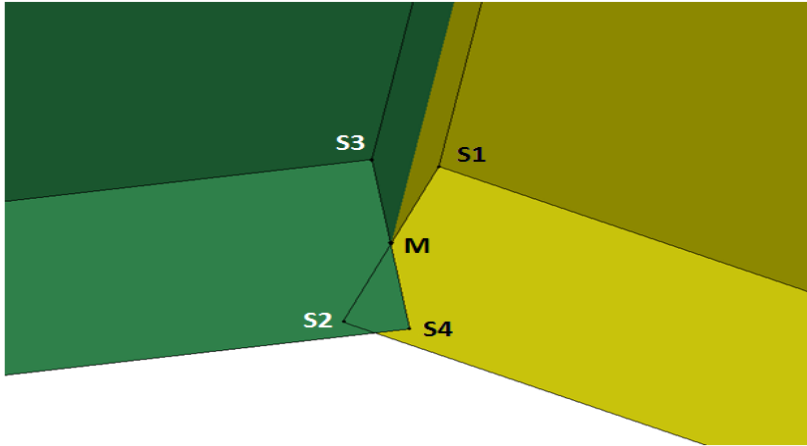


Рис. 1.6. Узел как набор из определяющей вершины M и жестко связанных с ней вершин S1-S4

Узел как набор жестких связей определяется поступательными и вращательными степенями свободы. Условие жесткой связи между определяющей вершиной (оболочечной или балочной) и зависимой вершиной (принадлежащей объемному элементу) в конечно-элементной аппроксимации вводится как многоточечное ограничение (MPC – multi-pointconstraint), в векторной форме записанное как:

$$\vec{U}_s = \vec{U}_m + \vec{\omega}_m (\vec{R}_s - \vec{R}_m),$$

где \vec{U}_s , \vec{U}_m – вектора поступательных перемещений определяющей master-вершины и зависимой slave-вершины, $\vec{\omega}_m$ – вектор вращательных перемещений master-вершины, \vec{R}_s , \vec{R}_m – радиус-вектора определяющей и зависимой вершин. Исходя из этого уравнения, поступательное движение вершин сгенерированной сетки из объемных элементов определяется поступательным и вращательным движением определяющих вершин исходной сетки из оболочечных или балочных элементов.

Таким образом, введение понятия «узел» в Solid-Shell методологии является ключевым. Узлы не только обеспечивают связность между вершинами сгенерированной сетки из объемных элементов, но и сохраняют в конечно-элементной модели из трехмерных объемных элементов вращательные степени свободы, присущие аппроксимациям исходных оболочечных и балочных элементов.

Как было сказано выше, узлы вводятся в рассмотрение в вершинах, в которых либо нормаль к поверхности является разрывной (благодаря углам, изгибам или соединениям разных поверхностей), либо меняется толщина оболочечной поверхности, либо имеет место соединение элементов разного типа (балок с оболочками). Кроме этого, узлы формируются в вершинах, в которых наложены ограничения на вращательные степени свободы, а также в вершинах с заданным вращательным или изгибным моментом. Это необходимо для наследования граничных условий, заданных для исходной оболочечной или балочной сетки, на сетку из объемных элементов.

2. Результаты расчета

В качестве иллюстрации применения метода Solid-Shell в рамках пакета программ ЛОГОС для численного решения задач статической прочности в данном разделе представлены результаты расчетов ряда практических задач.

2.1. Задача «Изгиб пластины»

В подразделе приведены результаты решения трех вариантов задачи на изгиб пластины с учетом эффекта геометрической нелинейности. В расчетах моделировались три разных типа изгибных деформаций – изгиб при нагрузке в плоскости пластины/приложение нагрузки по оси Y (рис. 2.1); изгиб при нагрузке, нормальной плоскости пластины/приложение нагрузки по оси Z (рис. 2.2); нагрузка, приводящая к скручивающему деформированию/противоположные нагрузки по оси Z в двух узлах (рис. 2.3); слева пластины закреплены от перемещений.

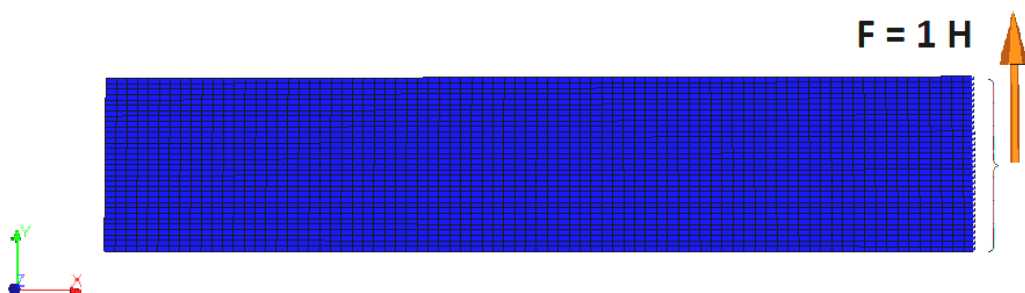


Рис. 2.1. Нагрузка в плоскости пластины

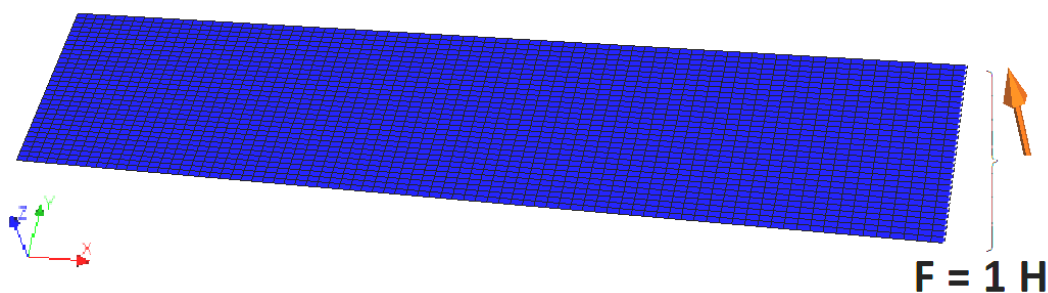


Рис. 2.2. Нагрузка, нормальная плоскости пластины

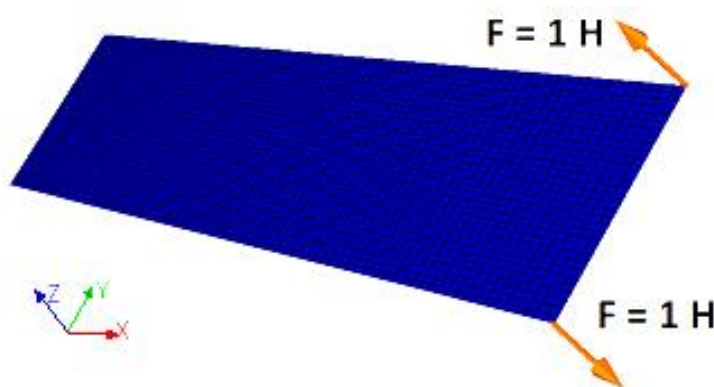


Рис. 2.3. Закручивающая нагрузка

Ниже представлено сравнение эталонных значений и результатов, полученных по пакету ЛОГОС-Прочность (с привлечением Solid-Shell подхода и без него).

| | Максимальное суммарное перемещение, мм | | |
|--|--|--|------------------------|
| | нагрузка в плоскости пластины | нагрузка по нормали к плоскости пластины | закручивающая нагрузка |
| Эталонное решение | 8,52509 | 23,8068 | 6,09903 |
| ЛОГОС-Прочность (Solid-Shell) | 8,50709 | 23,6541 | 5,99552 |
| <i>Погрешность с эталонным решением, %</i> | 0,2111 | 0,6414 | 1,6972 |

| | Максимальное напряжение по Мизесу, кгс/мм ² | | |
|--|--|--|------------------------|
| | нагрузка в плоскости пластины | нагрузка по нормали к плоскости пластины | закручивающая нагрузка |
| Эталонное решение | 495,258 | 144,651 | 280,062 |
| ЛОГОС-Прочность (Solid-Shell) | 494,482 | 144,180 | 272,062 |
| <i>Погрешность с эталонным решением, %</i> | 0,1567 | 0,3256 | 2,8565 |

Как видно из приведенных результатов, алгоритмы нелинейного деформирования, реализованные в ЛОГОС-Прочность для объемных элементов, оказываются применимыми и в случае их использования для моделирования оболочечных элементов по Solid-Shell технологии. Для трех вариантов нелинейного деформирования оболочки с большими перемещениями получено согласие с эталонным решением (разница в перемещениях <2 %; разница в максимальных напряжениях <3 %).

2.2. Расчет пластины под давлением

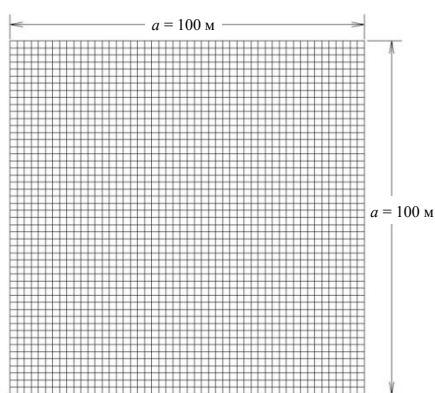


Рис. 2.4. Конечно-элементная модель пластины

В данной задаче необходимо определить прогибы и напряженное состояние пластины, нагруженной равномерным давлением. Конечно-элементная модель строится с использованием изгибно-мембранных 2D элементов. Цель процедуры – оценка возможности учета больших прогибов. Верификация выполнялась путем сопоставления эталонных результатов с результатами, полученными по пакету ЛОГОС-Прочность.

Расчетная сетка пластины содержала 2601 узлов и 2500 изгибно-мембранных плоских конечных элементов. Конечно-элементная модель пластины представлена на рис. 2.4. Характерный размер конечных элементов 2×2 мм. Модуль упругости материала пластины $E = 21000$ кгс/мм², коэффициент Пуассона $\nu = 0,3$, толщина пластины $\delta = 1$ мм, ее сторона $a = 100$ мм. Материал считался линейно-упругим.

По всем кромкам пластина жестко закреплена. Взаимное сближение кромок пластины отсутствует. Пластина нагружена равномерно распределенным давлением интенсивностью $p = 18 \text{ кгс/мм}^2$. На рис. 2.5 показана схема закрепления и нагружения пластины.

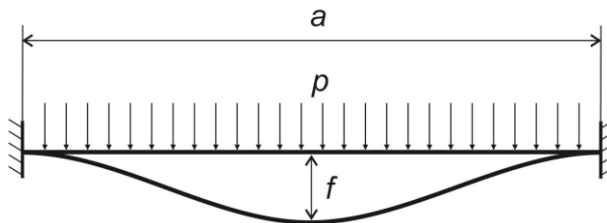


Рис. 2.5. Схема закрепления и нагружения пластины

Задача решалась в геометрически нелинейной постановке с учетом больших деформаций. В расчетах интересовала зависимость величины прогиба в центре пластины от величины прикладываемого давления.

На рис. 2.6 показано деформированное состояние пластины на конечный момент нагружения в расчете по ЛОГОС-Прочность по Solid-Shell технологии.

LEGAK-DK
Time = 1
Contours of Resultant Displacement
min=0, at node# 1
max=13.0739, at node# 1301

Fringe Levels
1.307e+01
1.177e+01
1.046e+01
9.152e+00
7.844e+00
6.537e+00
5.230e+00
3.922e+00
2.615e+00
1.307e+00
0.000e+00

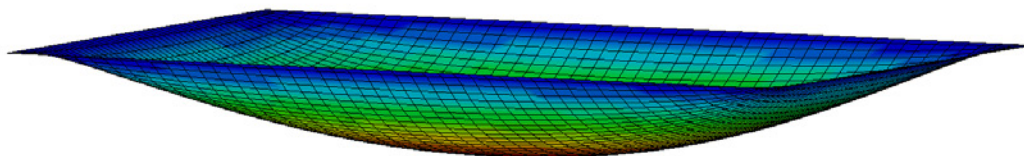


Рис. 2.6. Деформированное состояние пластины на конечный момент нагружения в расчете по ЛОГОС-Прочность

На рис. 2.7 приведена зависимость безразмерного прогиба ($f^* = f/\delta$) от величины безразмерного параметра давления ($p^* = p/E_1(a/\delta)^4$, где $E_1 = E/(1 - \nu^2)$); решение проводилось по ЛОГОС-Прочность. Там же приведены результаты аналитического решения [1].

Как видно из приведенных графиков, решение данной нелинейной задачи по ЛОГОС-Прочность с использованием Solid-Shell технологии отлично согласуется с аналитическим.

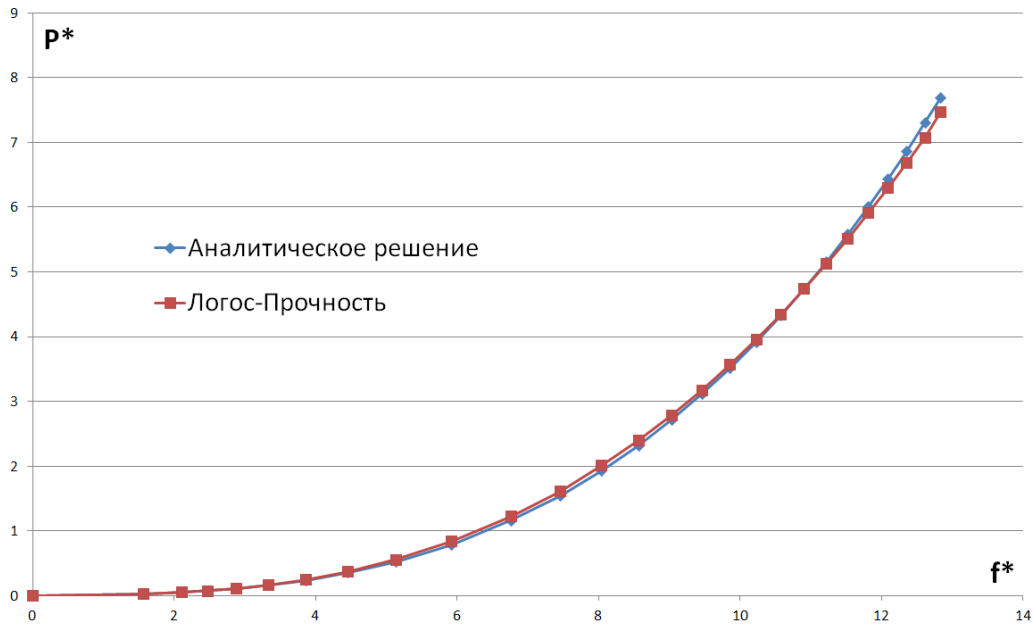


Рис. 2.7. Диаграмма «нагрузка-прогиб»

2.3. Расчет панелей конструкции летательного аппарата

Общий вид экспериментальной панели и ее геометрические параметры представлены на рис. 2.8. Необходимо определить критическое усилие сжатия панели, при котором исчерпывается ее несущая способность, т. е. она не может воспринимать возрастающую нагрузку.

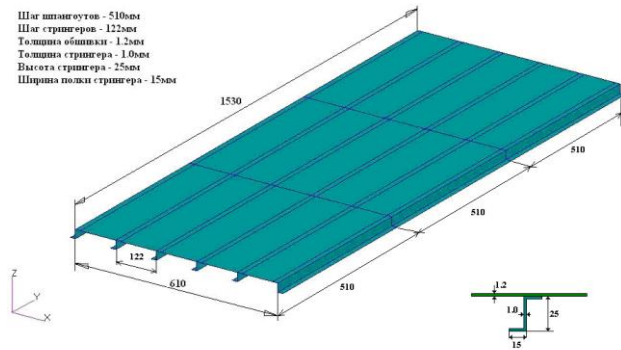


Рис. 2.8. Геометрическая модель панели

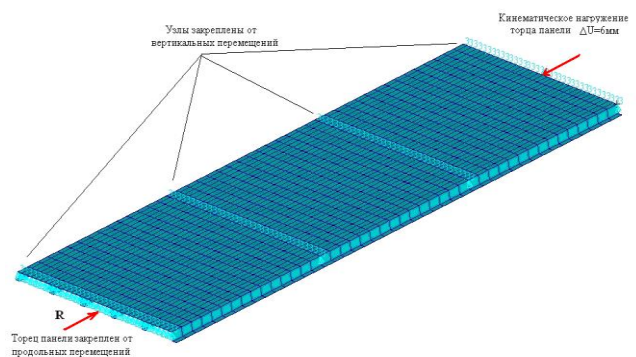


Рис. 2.9. Конечно-элементная модель панели

Конечно-элементная модель панели представлена на рис. 2.9. Для моделирования использовались изгибно-мембранные оболочечные элементы.

Материал панели – алюминиевый сплав типа 1163 ($E = 7200 \text{ кгс/мм}^2$, $\nu = 0,3$). Материал считался линейно-упругим.

На левом торце панель закреплена от продольных и вертикальных перемещений. В местах расположения шпангоутов узлы расчетной сетки закреплены от перемещений из плоскости панели. Правый торец панели закреплен от продольных перемещений. К левому торцу в продольном направлении задается кинематическое нагружение в виде перемещения $\Delta U = 6 \text{ мм}$.

Задача решалась в геометрически нелинейной постановке с заданным инкрементом приращение по нагрузке 0,05.

Расчет по ЛОГОС-Прочность с учетом геометрической нелинейности удалось провести до 80 % прикладываемой нагрузки. По достижению данного нагружения начинался сильный рост деформаций, приводящий к искаженным ячейкам и невозможности дальнейшего счета.

В таблице ниже приведено сравнение эталонного решения и решения, полученного по ЛОГОС-Прочность по величине разрушающей нагрузки.

| | Момент достижения критической нагрузки (% от полной прикладываемой нагрузки) |
|----------------------------------|---|
| Эталонное решение | 76 % |
| ЛОГОС-Прочность (Solid-Shell) | 80 % |

Заключение

В данной работе представлено описание программной реализации в рамках комплекса ЛОГОС технологии Solid-Shell, обеспечивающей возможность моделирования нелинейного деформирования тонкостенных конструкций, состоящих из балочных и оболочечных конечных элементов. Ключевой аспект реализованной технологии заключается в восполнении одномерных и двумерных элементов до объемных элементов с учетом толщины и локальной ориентации балок и оболочек. При этом для конечного пользователя сохраняется легкость в постановке модели и интерпретации результатов, поскольку все процедуры построения объемной сетки и обратного восполнения до исходной плоской/одномерной сетки скрыты внутри кода. Кроме того, реализованный набор процедур расширения плоской сеточной топологии до сетки из объемных элементов может быть востребован и повторно использован в других программных модулях пакета ЛОГОС-Прочность – в программах визуализации, а также в контактных алгоритмах для нахождения взаимопenetрации контактирующих поверхностей. Хорошее согласие результатов расчетов рассмотренных задач с эталонными решениями или решениями, предоставленными предприятиями, указывают на готовность метода Solid-Shell с достаточной степенью точности описывать процессы нелинейного деформирования на оболочках и балках.

Литература

1. Вольмир А. С. Гибкие пластинки и оболочки. М.: Государственное издательство технико-технической литературы, 1956.
2. Циберев К. В., Авдеев П. А., Артамонов М. В. и др. Пакет программ ЛОГОС. Функциональные возможности для решения задач прочности / Под ред. Р. М. Шагалиева // Труды XIII Международного семинара «Супервычисления и математическое моделирование» Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2011.
3. Речкин В. Н., Спиридонов В. Ф., Циберев К. В. и др. Пакет программ ЛОГОС. Модуль решения квазистатических задач прочности и модального анализа / Под ред. Р. М. Шагалиева // Там же.
4. Bischoff M., Ramm E. Solid-like shell or shell-like solid formulation? A personal view // ECCM'99 Proc. European Conference on Computational Mechanics, Munich, Germany, 31 Aug.–3 Sept. 1999.
5. Flores G. F., Onate E. A basic thin shell triangle with only translational DOFs for large strainplasticity // Int. J. Numer. Methods Eng. 2001. Vol. 51. P. 57–83.
6. Wriggers P., Eberlein R., Reese S. A comparison of three-dimensional continuum and shell elements for finite plasticity // Int. J. Solids Struct. 1996. Vol. 33. P. 3309–3326.
7. Sze K. Y., Chan W. K., Pian T. H. H. An eight-node hybrid-stress solid-shell element for geometric non-linear analysis of elastic shells // Int. J. Numer. Methods Eng. 2002. Vol. 55. P. 853–878.

8. Dhondt G. The Finite Element Method for Three-dimensional Thermomechanical Applications. John Wiley & Sons, 2004.

9. Dhondt G. CalculiXCrunchiX USER'S MANUAL version 2.5. [Electronic resource]. Mode of access: www.calculix.de, 2012.

ПАКЕТ ПРОГРАММ ЛОГОС. УЧЕТ ЭФФЕКТОВ ПОЛЗУЧЕСТИ ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧ СТАТИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ

Р. А. Барабанов, Д. Ю. Дьянов, Е. А. Филимонкин, К. В. Циберева

Российский федеральный ядерный центр –
Всероссийский НИИ экспериментальной физики, г. Саров

Введение

В настоящее время во ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» разрабатывается пакет программ ЛОГОС для решения широкого круга задач механики деформируемого твердого тела на многопроцессорных вычислительных ресурсах [1]. Одной из составных частей данного пакета программ является модуль решения задач расчета напряженно-деформированного состояния (НДС) конструкций при квазистатических термосиловых воздействиях, основанный на методе конечных элементов (МКЭ). Этот модуль позволяет проводить численное решение задач статической прочности как в линейной, так и в нелинейной постановках. Ползучесть – один из видов так называемой физической, или материальной, нелинейности, обусловленной нелинейной зависимостью между тензорами деформаций и напряжений. Одну сторону этого явления – рост во времени деформаций при постоянной нагрузке – называют собственно ползучестью, а другую – уменьшение во времени напряжений при постоянной полной деформации – релаксацией. В общем случае ползучести изменение деформаций сопровождается и изменением напряжений. Обычно ползучесть учитывается при расчете и конструировании деталей машин, находящихся в процессе эксплуатации длительное время в нагретом состоянии. В таких условиях работают, например, элементы конструкций паровых и газовых турбин, реактивных двигателей, ядерных реакторов, паровых котлов, узлы оборудования нефтяной промышленности, детали химических аппаратов и тепловых приборов. В отдельный вид выделяют так называемую радиационную ползучесть – ползучесть, вызванную облучением материала потоком нейтронов. Особенностью расчетов на ползучесть является учет фактора времени, который в обычных расчетах на статическую нагрузку во внимание не принимается.

В данной работе приводятся базовые соотношения и расчетные формулы, используемые в пакете программ ЛОГОС для учета эффектов ползучести при численном моделировании процесса деформирования конструкций, находящихся в условиях квазистатического нагружения.

Для демонстрации работоспособности и эффективности реализованных функциональных возможностей по моделированию ползучести в докладе представлены результаты численного расчета задач, проведенного с использованием пакета программ ЛОГОС. Проводится сравнительный анализ полученных результатов с эталонными решениями.

1. Теоретические основы расчета процесса ползучести

Поскольку общее описание основных подходов и алгоритмов, используемых в пакете программ ЛОГОС для решения задач статической прочности конструкций, приведено, например, в [2], остановимся только на аспектах, связанных с реализацией алгоритма расчета процесса ползучести.