

**Пересыпкин В.П., Пересыпкин К.В.**

Самарский государственный аэрокосмический университет им. акад. С. П. Королева

**Исследование поведения элементов тонкостенной стрингерной оболочки в условиях осевого сжатия методом конечных элементов**

Работа тонкостенных стрингерных оболочек, как известно, сопровождается потерей устойчивости обшивки, отдельных элементов стрингера, стрингера в целом и, наконец, общей потерей устойчивости оболочки. Следовательно, в данном случае статический линейный анализ не может быть использован. Расчет на устойчивость также не позволит выявить несущую способность конструкции, так как в этом случае будет найдена нагрузка, при которой теряет устойчивость одна обшивка без силового набора, что не означает потерю несущей способности всей конструкции. При проектировании рассматриваемых конструкций данная проблема традиционно решается с использованием понятий «присоединенная обшивка», «редуцированная обшивка», которые эмпирически учитывают частичную потерю несущей способности обшивки. Результаты таких расчетов носят приближенный характер и, обычно, проверяются экспериментом. Учитывая выше сказанное, мы остановили свой выбор на нелинейном статическом анализе.

Развитые конечноэлементные системы дают возможность решения задач закритического поведения тонкостенных стрингерных оболочек напрямую, используя методы геометрической нелинейности без введения допущений о малости перемещений.

В данной работе на конкретном примере исследования поведения оболочки, подкрепленной силовым набором, иллюстрируются методологические и инструментальные возможности конечноэлементного программного продукта MSC/NASTRAN/PATRAN.

### Расчетная модель конструкции

Исследуемая оболочка, изображенная на рисунке 1, представляет собой цилиндрическую обечайку, ограниченную по краям стыковыми шпангоутами и подкрепленную 40 стрингерами с равномерным шагом ( $9^\circ$ ). Поперечное сечение стрингера изображено на рисунке 2.

К данной конструкции приложены нагружающие перемещения, сжимающие ее в

Рисунок 1. Стрингерная обечайка

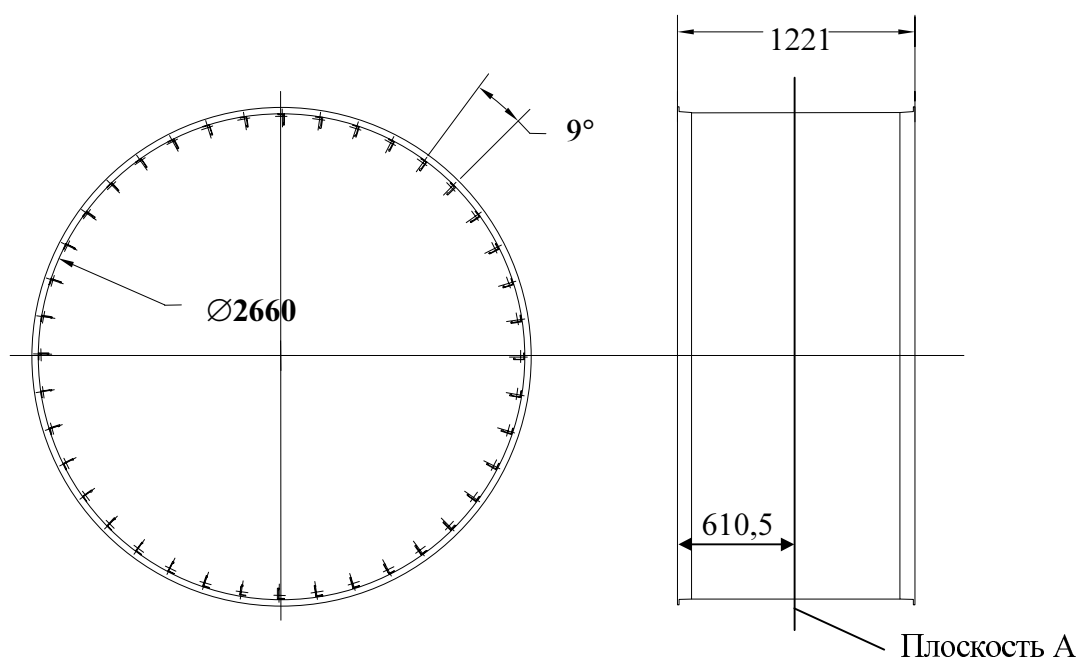
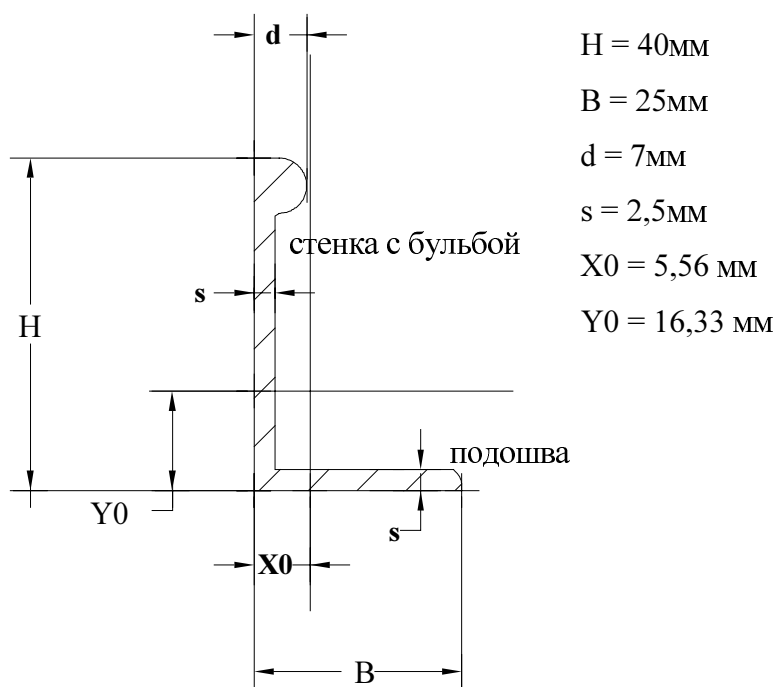


Рисунок 2. Поперечное сечение стрингера



направлении продольной оси обечайки на 13 мм.

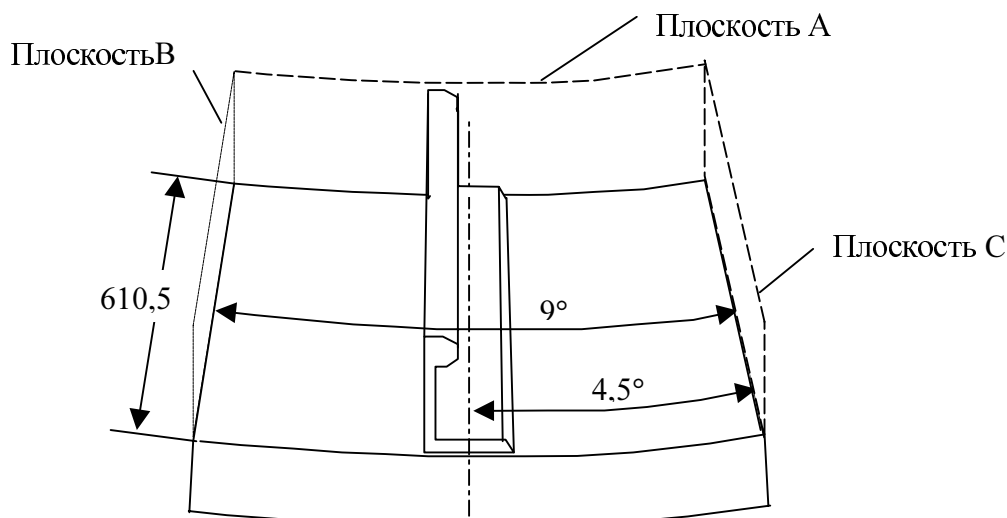
В процессе моделирования предполагалось, что силы, возникающие в конструкции из-за нагружающих перемещений, передаются на стрингер со стыкового шпангоута в плоскости стыкового шпангоута и распределяются равномерно по сечению стрингера.

Решение задач нелинейного статического анализа конструкции требует больших вычислительных затрат, что вынуждает снизить размерность задачи.

Поскольку оболочка симметрична относительно плоскости поперечного сечения оболочки, делящей оболочку пополам (на рисунках 1 и 3 плоскость А), мы моделируем только половину оболочки, отсеченной этой плоскостью симметрии, а в самой плоскости симметрии вводим граничные условия симметрии. Соответственно, нагружающие перемещения на половину конструкции составят 6,5 мм.

Поскольку оболочка осесимметрична и стрингеры одинаковые логично было бы

Рисунок 3. Моделируемый сектор обечайки



рассматривать один сектор оболочки, имеющий длину одного пролета между соседними стрингерами и содержащий один стрингер, расположенный посередине этого сектора (смотрите рисунок 3). Однако возникает вопрос как крепить данный сектор конструкции на его границах с отсеченной частью конструкции. Из-за несимметричности поперечного сечения стрингера можно утверждать, что обшивка должна вести себя несимметрично относительно плоскостей, перпендикулярных обшивке и содержащих в себе границы рассматриваемого сектора с соседними секторами (плоскости В и С). И если эта несимметричность проявляется сильно, то не понятно как крепить рассматриваемый сектор оболочки (граничные условия, соответствующие условиям симметрии будут

некорректны). Для выяснения степени влияния несимметричности сечения стрингера на поведение обшивки было проведено исследование поведения сектора оболочки, представляющего собой четвертую часть оболочки по окружному направлению и содержащего в себе 10 стрингеров. Модель этого сектора оболочки приведена на рисунке 4. Для данной модели был проведен анализ линейного поведения и найдена форма потери устойчивости. На рисунке 5 изображено деформированное состояние модели четвертой части оболочки, полученное в результате линейного расчета. Можно заметить, что в результате того, что под действием сжимающей нагрузки оболочка расширилась в радиальном направлении, а силовой набор препятствует ей в этом, деформированное состояние обшивки представляет собой волны в окружном направлении, причем на один пролет обшивки между стрингерами приходится одна волна. На рисунке 6 изображена форма потери устойчивости для модели четвертой части оболочки. Форма деформаций обшивки в данной форме потери устойчивости представляет собой волны, как в продольном, так и в окружном направлениях. Причем в окружном направлении на один пролет оболочки между стрингерами приходится полволны. Проведенное выше исследование показало, что и статическое поведение конструкции и форму потери устойчивости приближенно можно считать симметричными относительно плоскостей В и С. На основании этих результатов в плоскостях В и С вводятся граничные условия симметрии относительно этих плоскостей.

Для того чтобы исключить из рассмотрения особенности местного поведения полок стрингера в области свободного конца поперечное сечение стрингера в плоскости стыкового шпангоута закрепляется по углам поворота из плоскости стыкового шпангоута.

Конечноэлементная модель моделируемого сектора оболочки приведена на рисунке 7.

Рисунок 4. Модель четвертой части обечайки

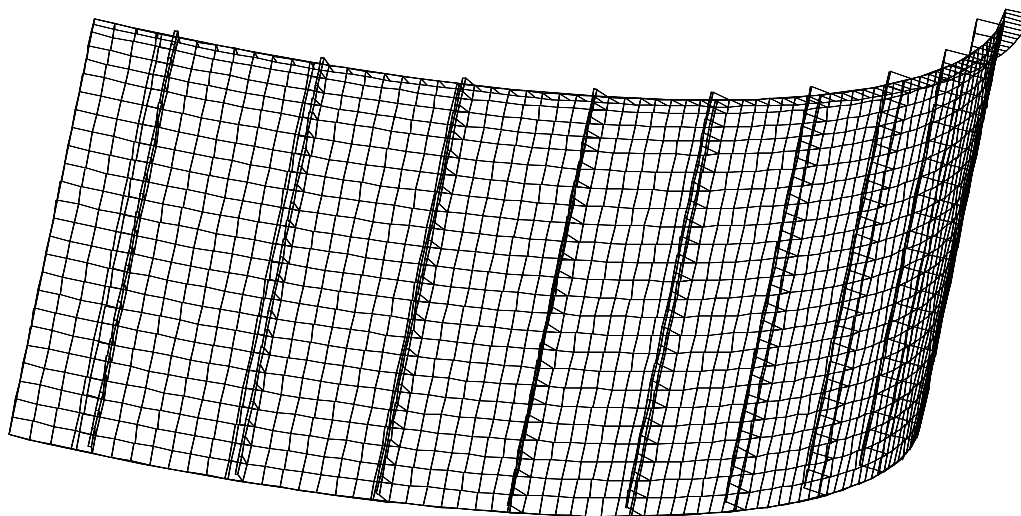
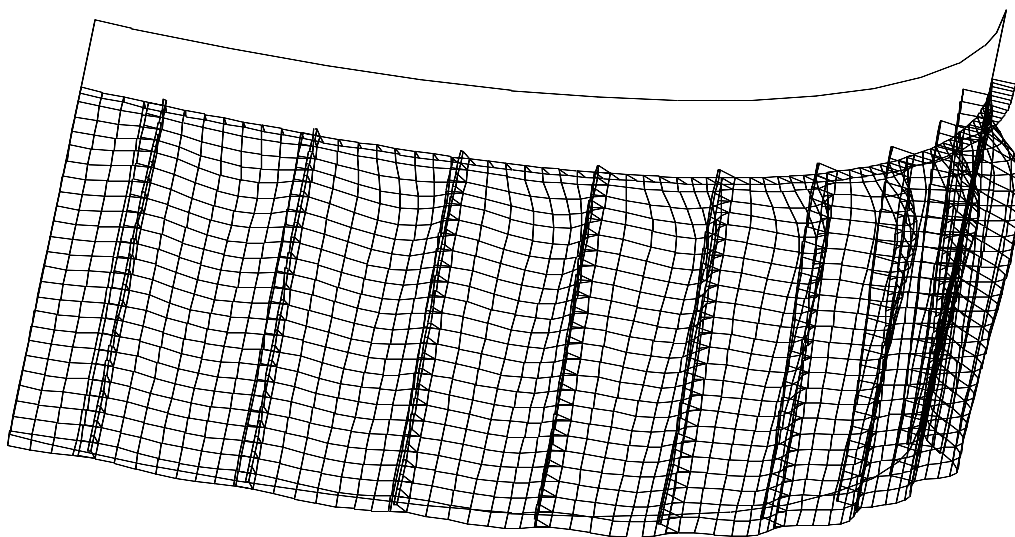
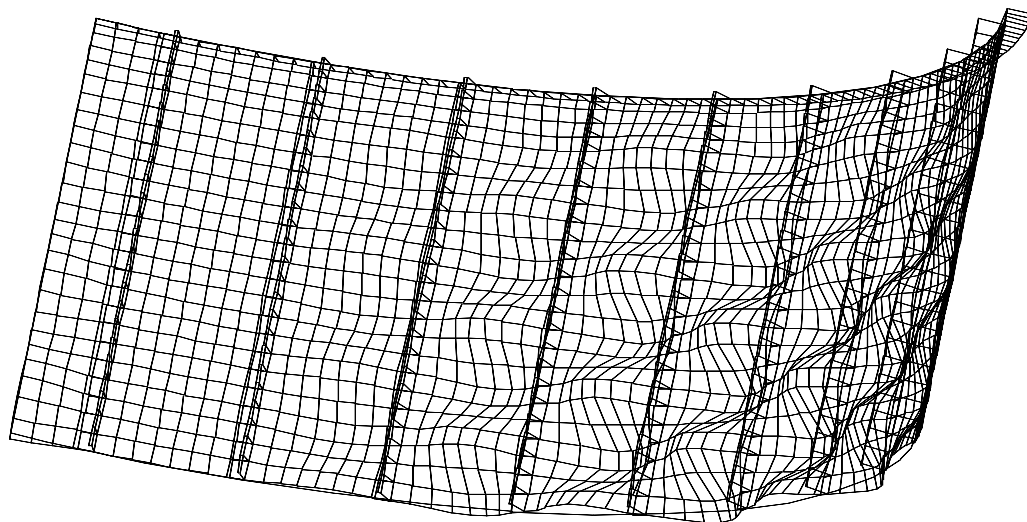


Рисунок 5. Деформации четвертой части обечайки, полученные из линейного расчета



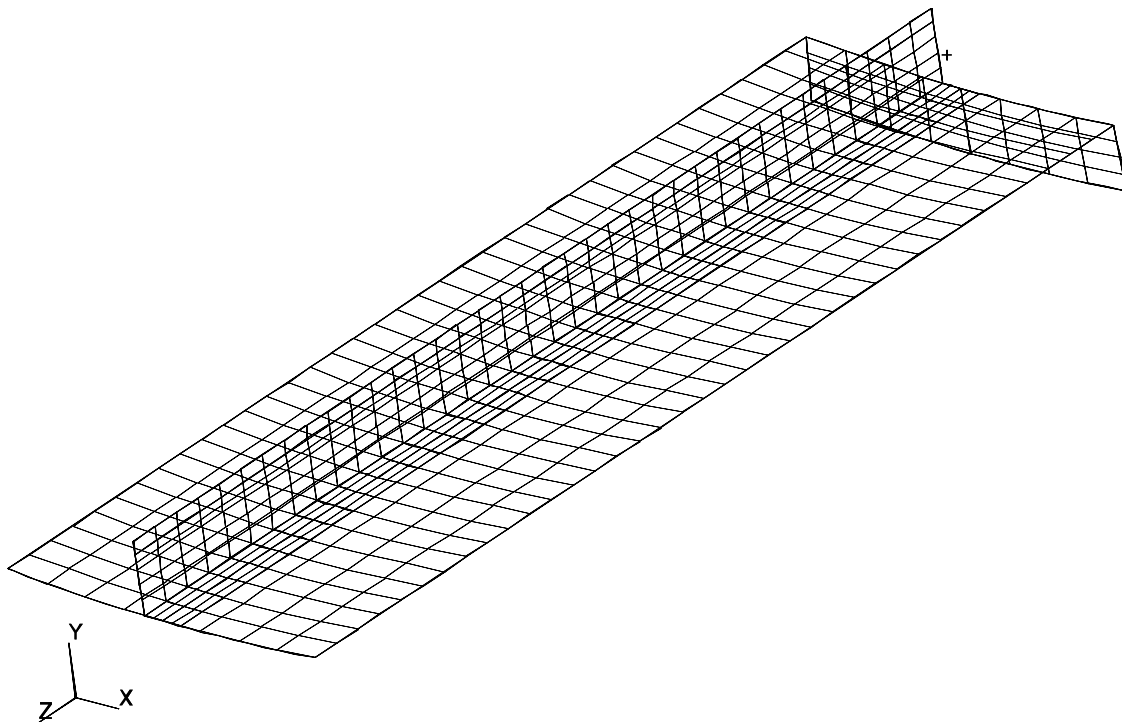
default\_Deformation :  
Max 9.46+000 @Nd 4226

Рисунок 6. Форма потери устойчивости четвертой части обечайки



default\_Deformation :  
Max 1.00+000 @Nd 4442

Рисунок 7. Модель рассматриваемого сектора



## **Анализ результатов расчетов**

Приведены следующие результаты.

1. Изображения деформаций конструкции в процессе пошагового нагружения (таблица 1). Строки таблицы соответствуют некоторым характерным величинам заданных сжимающих перемещений. В каждой строке перемещения показаны двумя способами: в увеличенном масштабе, чтобы при небольших нагрузках был виден характер деформаций, и в реальном масштабе, чтобы показать их величину.
2. Графики зависимости средних напряжений в обшивке, в стрингере и его полках, в полном сечении от величины нагружающего перемещения (рисунки 9, 10, 11). Под средними напряжениями элемента конструкции понимается отношение суммы продольных узловых сил в узлах, принадлежащих этому элементу в плоскости симметрии А к площади поперечного сечения элемента. При линейной работе элемента конструкции среднее напряжение пропорционально нагружающему перемещению. При нелинейном поведении - среднее напряжение ниже. Величина отличия от пропорционального значения характеризует степень нелинейности. Точка на графике, где средние напряжения достигают максимума и при дальнейшем нагружении не возрастают, означает потерю устойчивости на сжатие элемента конструкции.
3. Графики зависимости эффективной площади поперечного сечения обшивки, стрингера и всего сечения от нагружающего перемещения (рисунки 12,13). Под эффективной площадью понимается площадь поперечного сечения линейно работающего стержня, который при данной величине нагружающего перемещения передает ту же нагрузку, что и нелинейно работающий элемент конструкции.

Анализ результатов показывает следующее.

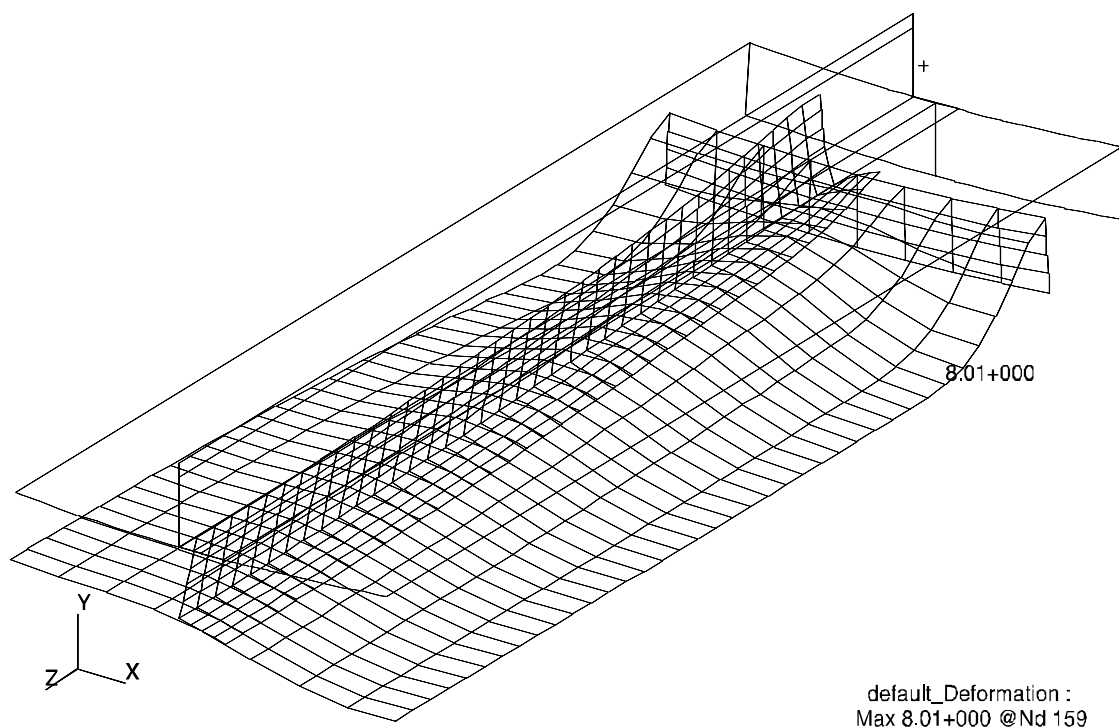
При малых нагрузках конструкция ведет себя линейно (сравнить строку 1 таблицы 1 с рисунками 5, 8). Линейные участки видны на графиках рисунков 9 – 13. При дальнейшем увеличении нагрузки до значения нагружающего перемещения 0.473 (строка 2 таблицы 1) появляются волны, характерные для потери устойчивости обшивки (рисунок 5). Затем почти без изменения нагружающего перемещения (с 0.473 до 0.477) происходит резкое изменение деформированного состояния с образованием трех (с учетом симметрии) глубоких вмятин внутрь оболочки (строка 3 таблицы 1). Это

свидетельствует о бифуркационном переходе конструкции в состояние с меньшей энергией деформации. На рисунках 9, 10 видно скачкообразное уменьшение значений средних напряжений. С этого момента деформации обшивки видны в реальном масштабе. Следующий бифуркационный переход происходит при увеличении нагружающего перемещения с 0.645 до 0.647 (строки 4, 5 таблицы 1 и скачки на рисунках 9, 10). При этом образуются еще две (с учетом симметрии) вмятины. Такая форма деформирования обшивки сохраняется до значения нагружающего перемещения 1.95 мм, после чего впадина, появившаяся последней, начинает уменьшаться за счет углубления средней впадины.

Рисунок 8. Деформации рассматриваемого сектора оболочки полученные из линейного анализа

MSC/PATRAN Version 8.1-F08 05-Sep-99 19:02:53

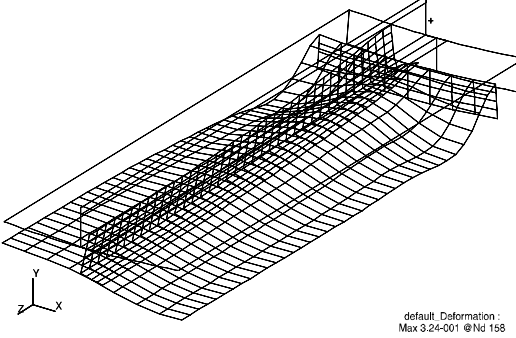
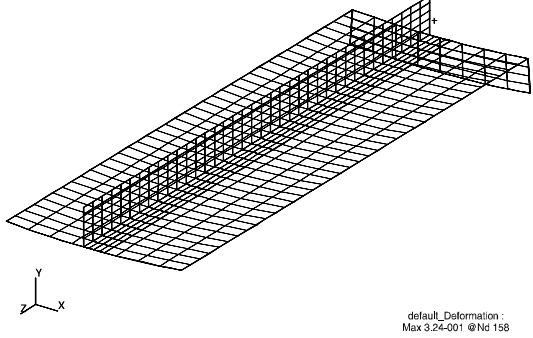
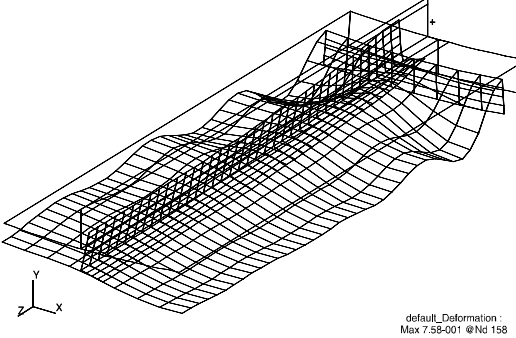
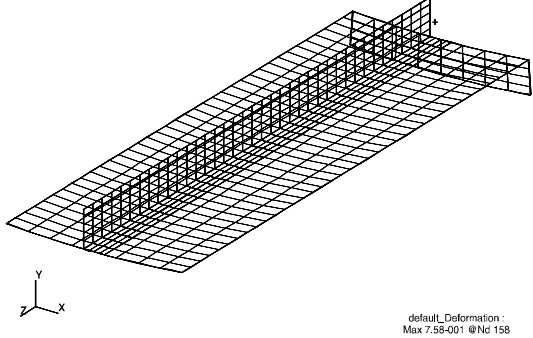
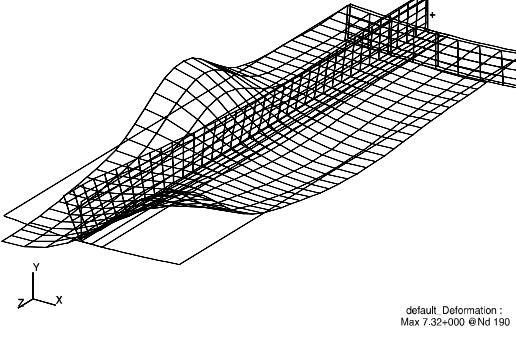
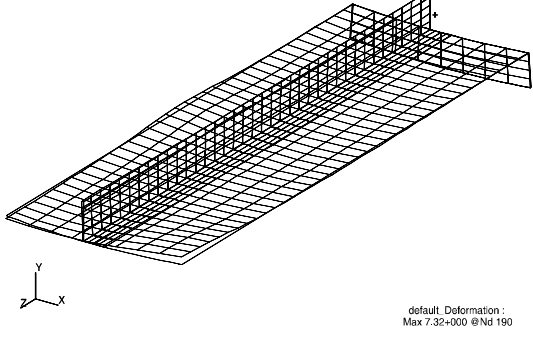
Deform: nolin\_1, Static Subcase, Displacements, Translational, (NON-LAYERED)

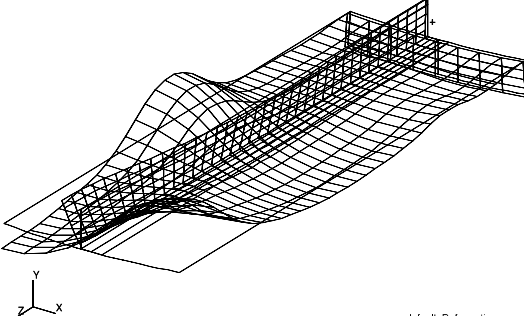
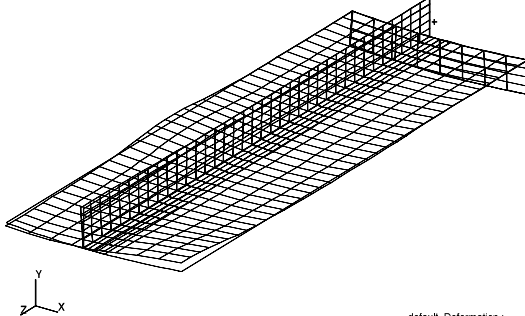
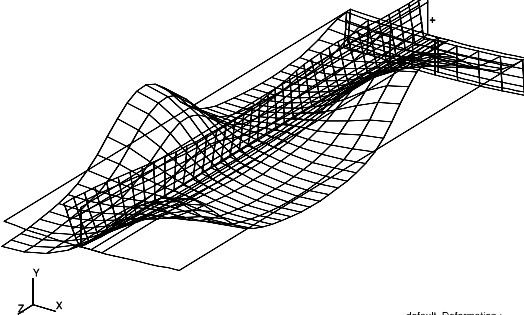
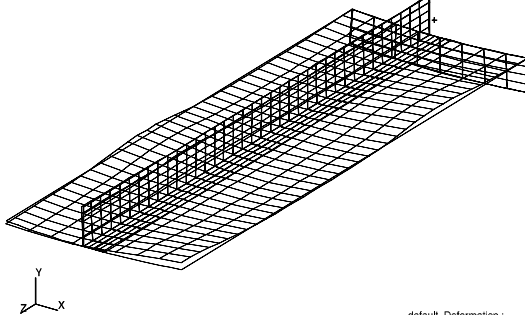
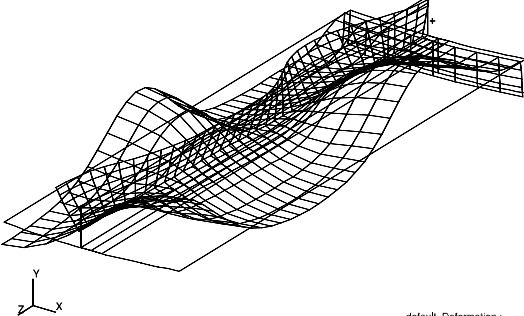
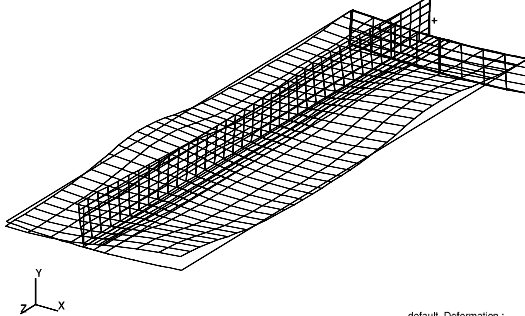
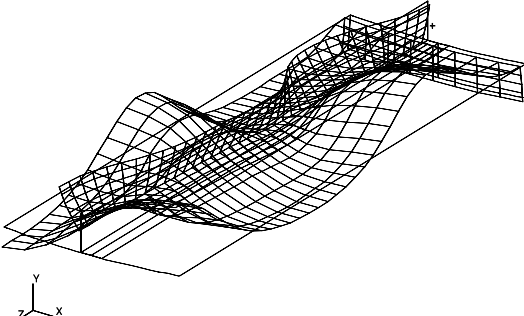
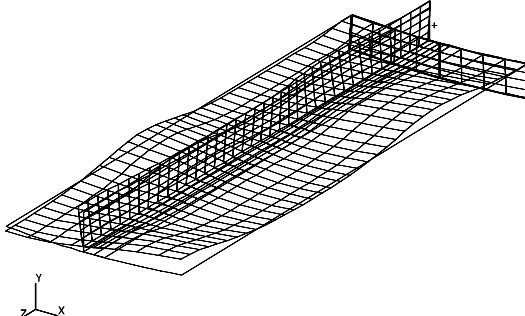


Полка стрингера с бульбой теряет устойчивость при нагружающем перемещении  $\sim 2$  мм и средних напряжениях 160 МПа. До потери устойчивости полка с бульбой изгибалась вбок по плавной кривой, а после потери устойчивости принимает форму зигзага, увеличивающегося по мере нагружения. При этом часть стрингера, ближняя к торцевому шпангоуту, выпрямляется, а средняя часть стрингера прогибается в плоскости полки с бульбой внутрь оболочки.

Полка стрингера – подошва теряет устойчивость при нагружающем перемещении ~2,5 мм, а уровень средних напряжений достигает 280 Мпа. После этого оболочка полностью теряет несущую способность.

Таблица 1. Процесс деформирования конструкции по мере увеличения нагрузки

№	нагруж. перемещ, мм	Увеличенные перемещения конструкции	Перемещения конструкции в реальном масштабе
1	0,244	<p>MSC/PATRAN Version 8.1-F08 05-Sep-99 19:05:58 Deform: nolin_1, PW Linear : 3.75 % of Load, Displacements, Translational, (NON-LAYERED)</p>  <p>default_Deformation : Max 3.24-001 @Nd 158</p>	<p>MSC/PATRAN Version 8.1-F08 05-Sep-99 19:35:56 Deform: nolin_1, PW Linear : 3.75 % of Load, Displacements, Translational, (NON-LAYERED)</p>  <p>default_Deformation : Max 3.24-001 @Nd 158</p>
2	0,473	<p>MSC/PATRAN Version 8.1-F08 05-Sep-99 19:07:27 Deform: nolin_1, PW Linear : 7.26563 % of Load, Displacements, Translational, (NON-LAYERED)</p>  <p>default_Deformation : Max 7.58-001 @Nd 158</p>	<p>MSC/PATRAN Version 8.1-F08 05-Sep-99 19:36:33 Deform: nolin_1, PW Linear : 7.26563 % of Load, Displacements, Translational, (NON-LAYERED)</p>  <p>default_Deformation : Max 7.58-001 @Nd 158</p>
3	0,477	<p>MSC/PATRAN Version 8.1-F08 05-Sep-99 19:07:57 Deform: nolin_1, PW Linear : 7.34375 % of Load, Displacements, Translational, (NON-LAYERED)</p>  <p>default_Deformation : Max 7.32+000 @Nd 190</p>	<p>MSC/PATRAN Version 8.1-F08 05-Sep-99 19:36:58 Deform: nolin_1, PW Linear : 7.34375 % of Load, Displacements, Translational, (NON-LAYERED)</p>  <p>default_Deformation : Max 7.32+000 @Nd 190</p>

№	нагруж. перемещ , мм	Увеличенные перемещения конструкции	Перемещения конструкции в реальном масштабе
4	0,645	<p>MSC/PATRAN Version 8.1-F08 05-Sep-99 19:09:11 Deform: nolin_1, PW Linear : 9.92188 % of Load, Displacements, Translational, (NON-LAYERED)</p>  <p>default_Deformation : Max 8.76+000 @Nd 190</p>	<p>MSC/PATRAN Version 8.1-F08 05-Sep-99 19:37:31 Deform: nolin_1, PW Linear : 9.92188 % of Load, Displacements, Translational, (NON-LAYERED)</p>  <p>default_Deformation : Max 8.76+000 @Nd 190</p>
5	0,647	<p>MSC/PATRAN Version 8.1-F08 05-Sep-99 19:09:37 Deform: nolin_1, PW Linear : 9.96084 % of Load, Displacements, Translational, (NON-LAYERED)</p>  <p>default_Deformation : Max 7.06+000 @Nd 190</p>	<p>MSC/PATRAN Version 8.1-F08 05-Sep-99 19:37:50 Deform: nolin_1, PW Linear : 9.96084 % of Load, Displacements, Translational, (NON-LAYERED)</p>  <p>default_Deformation : Max 7.06+000 @Nd 190</p>
6	1,95	<p>MSC/PATRAN Version 8.1-F08 05-Sep-99 19:29:18 Deform: nolin_1, PW Linear : 30. % of Load, Displacements, Translational, (NON-LAYERED)</p>  <p>default_Deformation : Max 1.36+001 @Nd 190</p>	<p>MSC/PATRAN Version 8.1-F08 05-Sep-99 19:38:34 Deform: nolin_1, PW Linear : 30. % of Load, Displacements, Translational, (NON-LAYERED)</p>  <p>default_Deformation : Max 1.36+001 @Nd 190</p>
7	2,28	<p>MSC/PATRAN Version 8.1-F08 05-Sep-99 19:31:20 Deform: nolin_1, PW Linear : 35. % of Load, Displacements, Translational, (NON-LAYERED)</p>  <p>default_Deformation : Max 1.58+001 @Nd 190</p>	<p>MSC/PATRAN Version 8.1-F08 05-Sep-99 19:38:50 Deform: nolin_1, PW Linear : 35. % of Load, Displacements, Translational, (NON-LAYERED)</p>  <p>default_Deformation : Max 1.58+001 @Nd 190</p>

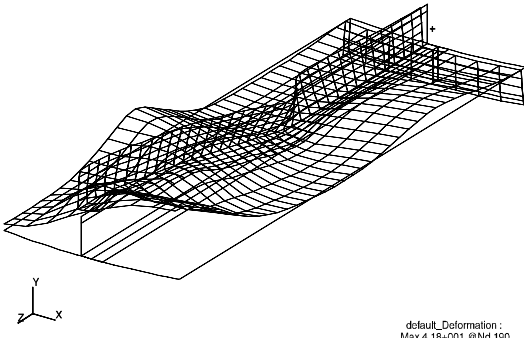
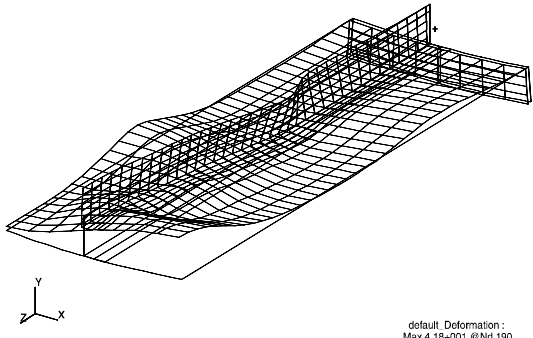
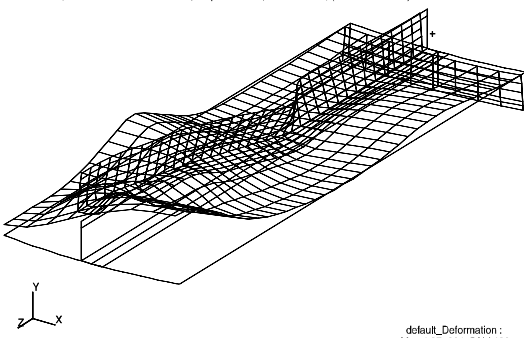
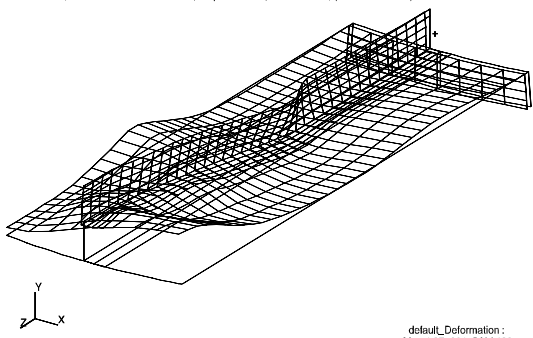
№	нагруж. перемещ., мм	Увеличенные перемещения конструкции	Перемещения конструкции в реальном масштабе
8	5,20	<p>MSC/PATRAN Version 8.1-F08 05-Sep-99 19:33:40 Deform: nolin_1, PW Linear : 80. % of Load, Displacements, Translational, (NON-LAYERED)</p> 	<p>MSC/PATRAN Version 8.1-F08 05-Sep-99 19:40:15 Deform: nolin_1, PW Linear : 80. % of Load, Displacements, Translational, (NON-LAYERED)</p> 
9	6,50	<p>MSC/PATRAN Version 8.1-F08 05-Sep-99 19:34:10 Deform: nolin_1, PW Linear : 100. % of Load, Displacements, Translational, (NON-LAYERED)</p> 	<p>MSC/PATRAN Version 8.1-F08 05-Sep-99 19:40:39 Deform: nolin_1, PW Linear : 100. % of Load, Displacements, Translational, (NON-LAYERED)</p> 

Рисунок 9. Зависимость средних напряжений от нагружающих перемещений для всей конструкции

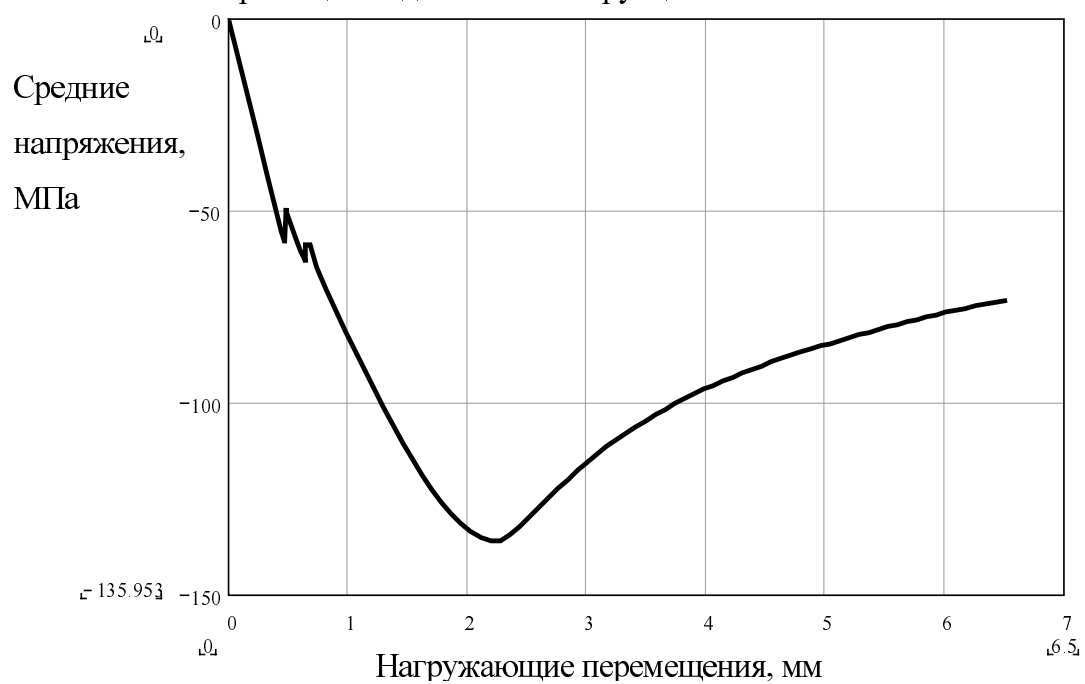


Рисунок 10. Зависимости средних напряжений от нагружающих перемещений для стрингера и обшивки

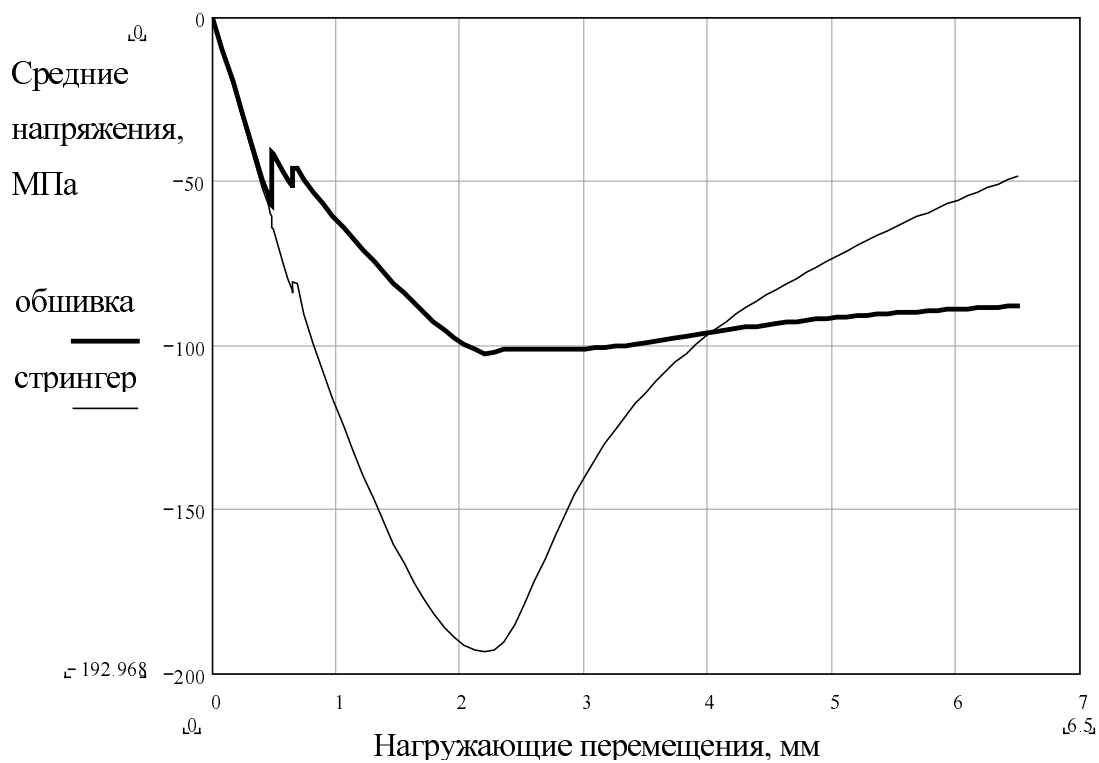


Рисунок 11. Зависимости средних напряжений от нагружающих перемещений для подошвы стрингера и стенки стрингера с бульбой

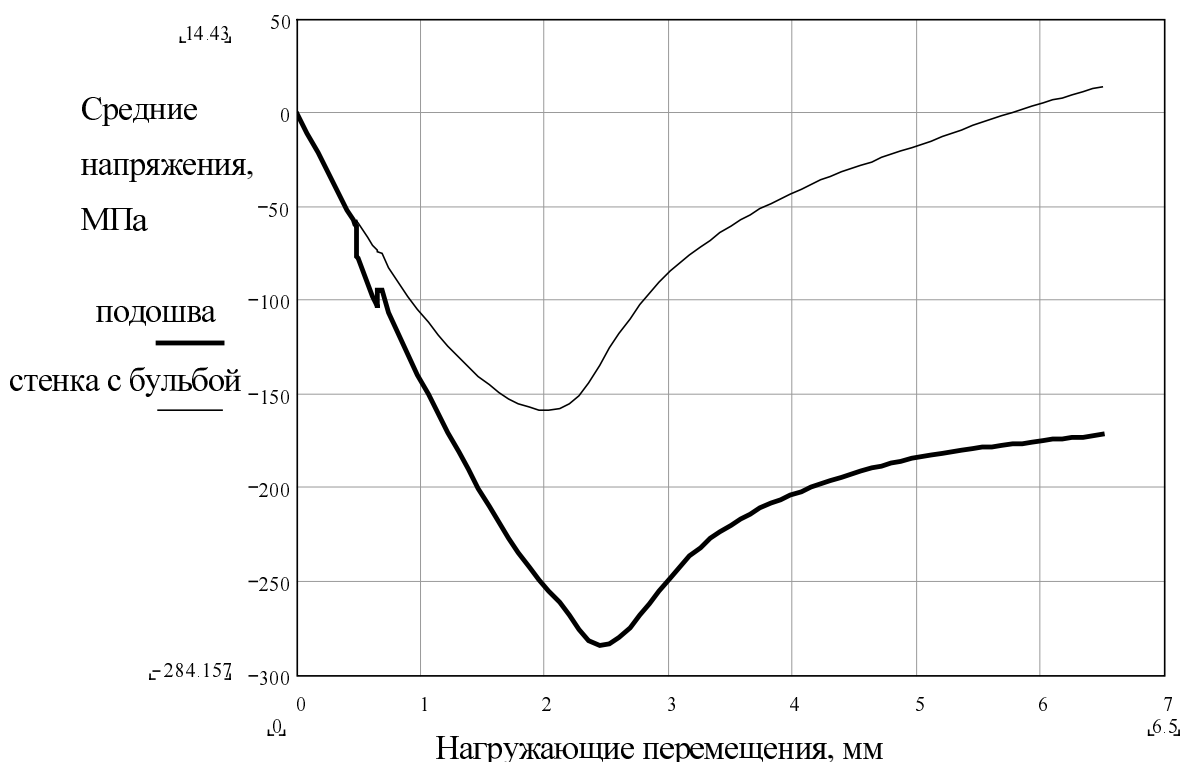


Рисунок 12. Зависимость эффективной площади всей конструкции от нагружающих перемещений

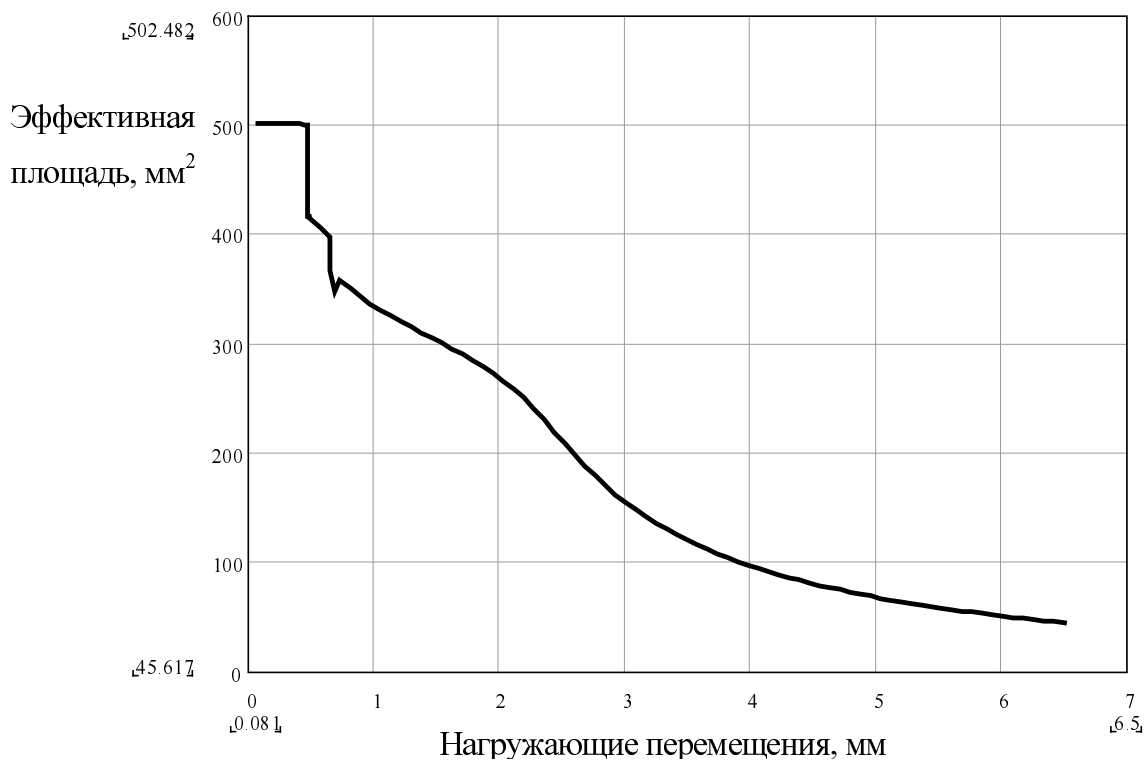
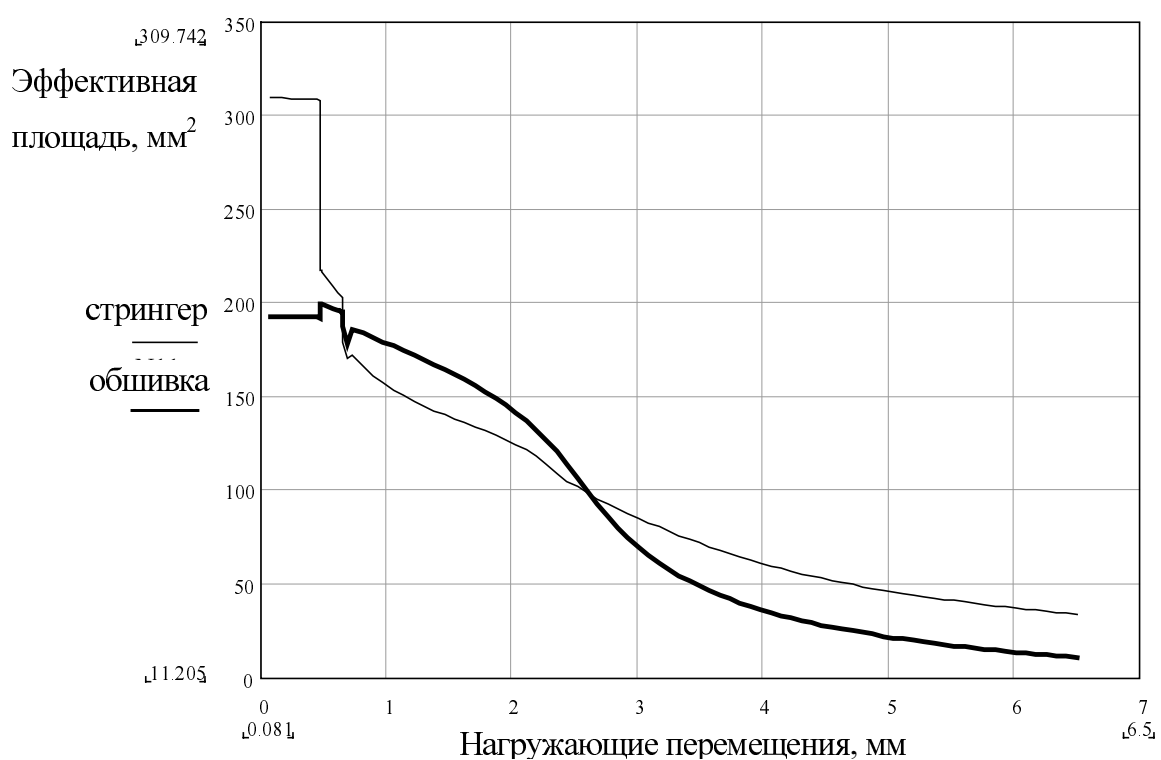


Рисунок 13. Зависимость эффективной площади стрингера и обшивки от нагружающих перемещений



## **Выводы**

В итоге можно отметить следующее.

1. В результате расчета несущей способности тонкостенной подкрепленной оболочки средствами системы MSC/NASTRAN/PATRAN удается исследовать процесс потери устойчивости оболочки с подробностью не достижимой при испытаниях, что позволяет совершенствовать конструкцию.
2. Полученные в подобных исследованиях результаты, можно использовать при исследованиях тонкостенных конструкций методом линейной статики. Для этого моделировать жесткости элементов тонкостенной конструкции нужно с учетом зависимостей средних напряжений от нагружающих перемещений.
3. Методы, алгоритмы решения геометрически нелинейных задач в MSC/NASTRAN/PATRAN отработаны так, что позволяют решать их в повседневной инженерной практике, хотя настройки алгоритмов для обеспечения сходимости требуют определенных навыков и опыта работы.