



# **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОМПЛЕКСА SCAD ДЛЯ ПРОВЕРКИ УСТОЙЧИВОСТИ**



# 1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ И НЕМНОГО ТЕОРИИ



**В комплексе SCAD проверка устойчивости равновесия выполняется в классическом Эйлеровом смысле для упругой системы. Режим проверки устойчивости может дать ответ на три вопроса:**

- каков коэффициент запаса устойчивости, т.е. во сколько раз нужно увеличить нагрузку, чтобы произошла потеря устойчивости;**
- какова форма потери устойчивости;**
- чему равны расчетные длины стержневых элементов по Ясинскому, т.е. какова длина шарнирно опертого стержня, теряющего устойчивость при том значении продольной силы, при котором происходит потеря устойчивости рассматриваемой системы.**



## Проверка устойчивости

**Проверка общей устойчивости системы**

Вид расчета

- Коэффициент устойчивости
- Формы потери устойчивости
- Свободные длины стержней

Параметры

Верхняя граница поиска:

Точность вычислений:

Проверка устойчивости

- По загрузкам
- Для всех загрузок
- По комбинациям загрузок
- Для указанных загрузок

Список загрузок (комбинаций)

1 6

Удаление данных    ОК    Отмена    Справка

Если коэффициент запаса превышает эту величину, то его поиск прекращается

Кроме заказанных здесь результатов в протоколе будет указан элемент, на котором реализуется «местная» потеря устойчивости при полностью нулевом собственном векторе (неподвижных узлах системы)



## Условие потери устойчивости

$$K(N)Z = 0, \quad Z \neq 0 \quad \rightarrow \quad \det K = 0$$

Вектор  $Z$  - форма потери устойчивости.

Умножая слева на  $Z^T$  переходим к энергетической формулировке:

$$Z^T K(N) Z = 0$$

$$Z^T K_1(N) Z > 0; \quad Z^T K_2(N) Z < 0$$

▲  
Удерживающая часть

▲  
Толкающая часть



## 2. ПРИМЕНЕНИЕ ОБОЛОЧЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ



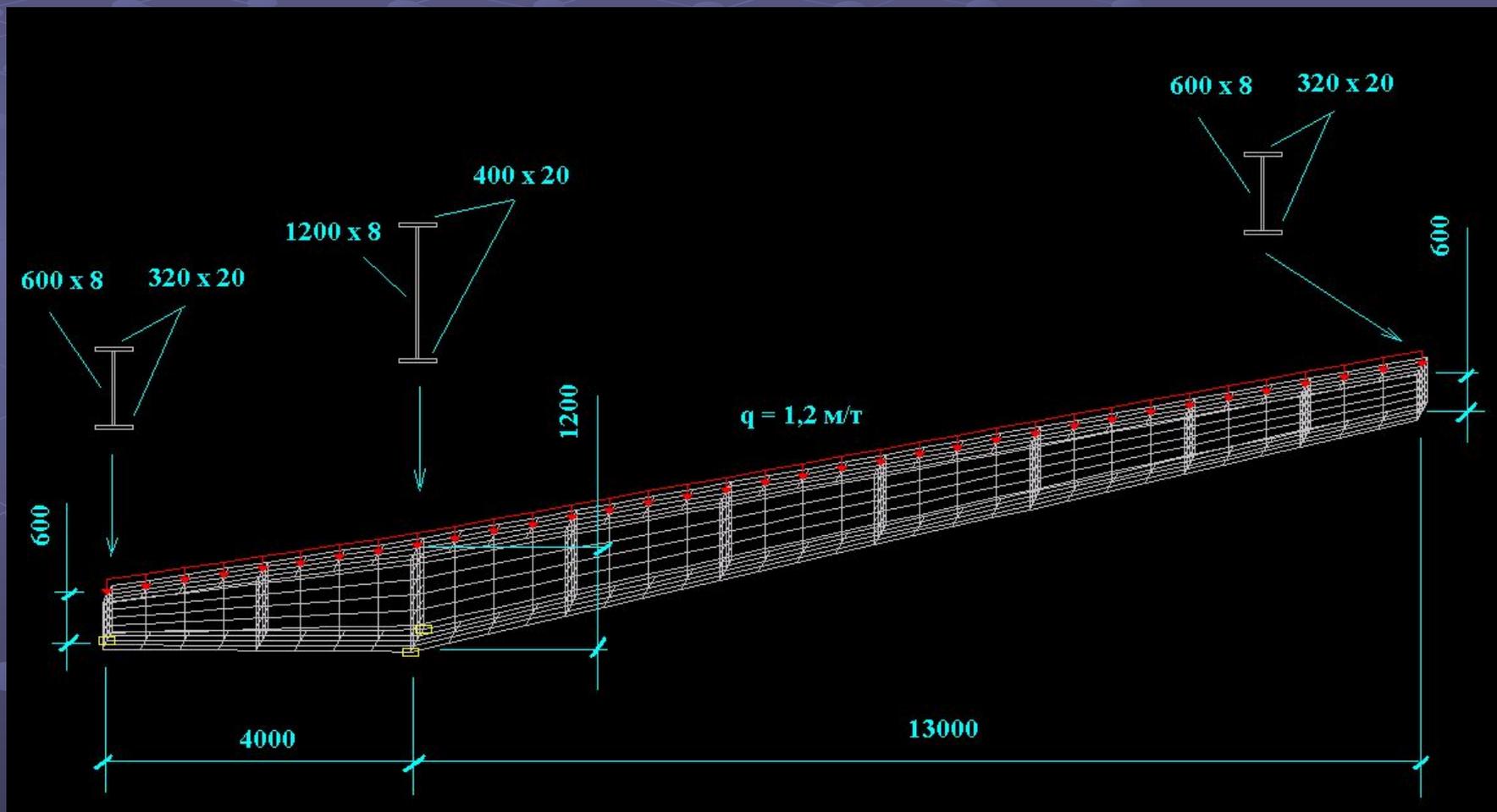
# ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

При проектировании высоких составных балок возникает проблема оценки устойчивости плоской формы изгиба и местной устойчивости. Рекомендации СНиП II-23-81\* не всегда пригодны, например, для балок переменной высоты. В этом случае можно воспользоваться такой возможностью SCAD, как оценка устойчивости систем, составленных из оболочечных элементов.



# СОЗДАНИЕ РАСЧЕТНОЙ МОДЕЛИ

Балочная конструкция заменяется набором плоских оболочечных конечных элементов, например, таким образом:





# СОЗДАНИЕ РАСЧЕТНОЙ МОДЕЛИ

## Основные проблемы.

1. Необходимое число дроблений стенки и пояса - следует исходить из того, что ожидаемая форма потери устойчивости (включая и локальные эффекты) должна быть хорошо представлена конечноэлементной моделью. Лучше перестараться и предусмотреть достаточно мелкий шаг сетки. Наилучшей проверкой является сопоставление решения с результатом, полученным на сгущенной сетке.
2. Аккуратное моделирование внешних раскреплений необходимо продумать, являются ли раскрепляющие элементы жесткими, чтобы их можно было представить в виде узловых связей. Если есть сомнения, то лучше установить податливые связи.



# РЕЗУЛЬТАТЫ ПЕРВОГО РАСЧЕТА

The screenshot shows the Structure CAD software interface. The main window displays a 3D wireframe model of a structure, possibly a bridge or a long-span structure, with red arrows indicating the direction of applied loads. The interface includes a menu bar (Проект, Файл, Опции, Операции, Сервис, Справка), a toolbar with various icons, and a ribbon with tabs: Управление, Схема, Назначения, Узлы и Элементы, **Загрузки**, and Группы. A log window in the bottom right corner contains the following text:

```
15:34:30
Анализ устойчивости системы для загрузки 1.
15:34:57
Коэффициент запаса устойчивости системы 0.778198.
15:34:59
Вычисление формы потери устойчивости системы для загрузки 1.
15:35:02
При вычислении формы потери устойчивости системы превышено
заданное
число итераций. Достигнута точность - 0.0020
15:35:03
ЗАДАНИЕ ВЫПОЛНЕНО
Затраченное время : 0.62 мин.
```

$$K = 0,778 < 1,5$$



# РЕЗУЛЬТАТЫ ПЕРВОГО РАСЧЕТА

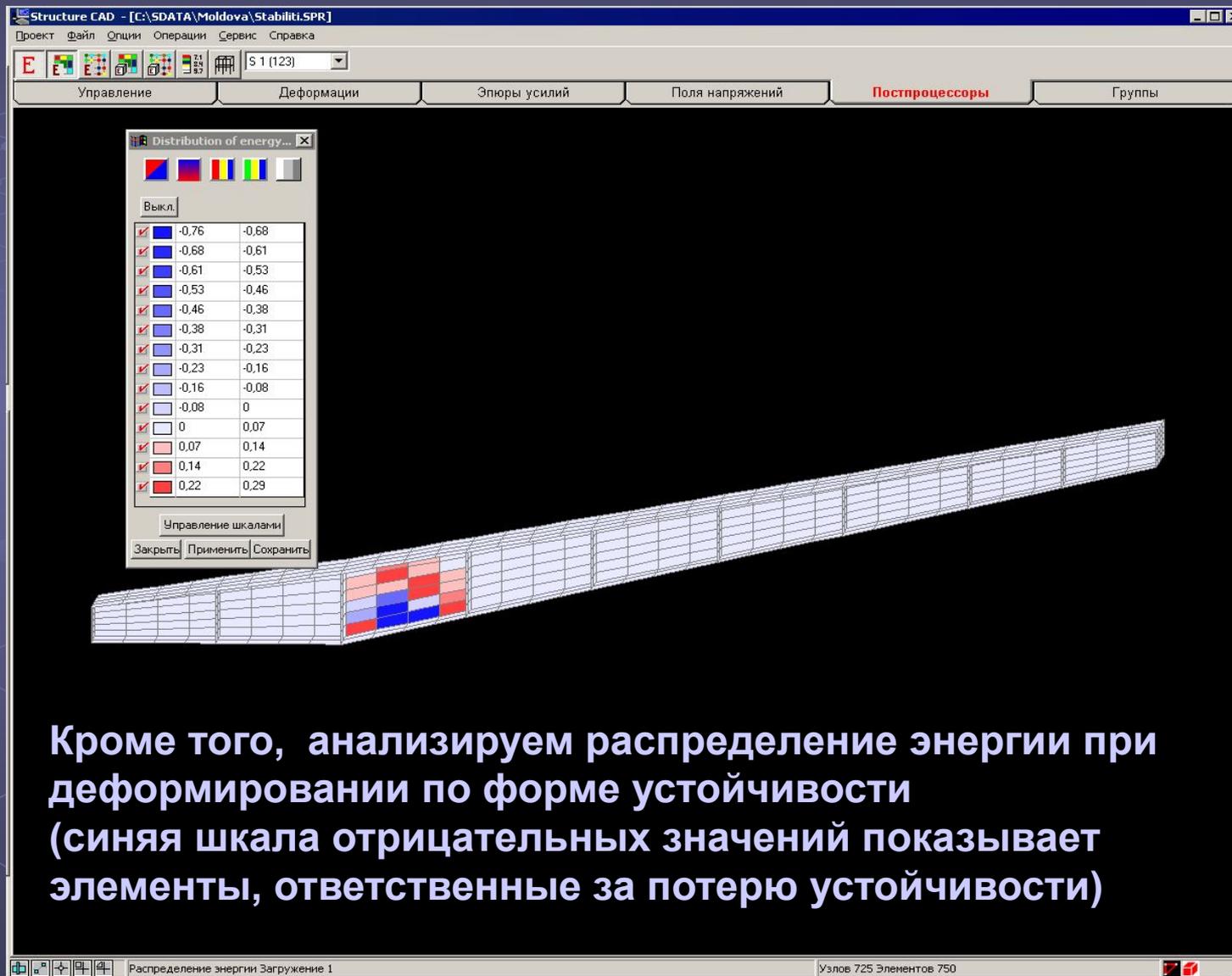


Для оценки обстановки анализируем форму потери устойчивости

Локальная форма потери устойчивости. Необходимо либо увеличивать толщину стенки, либо устанавливать ребра



# РЕЗУЛЬТАТЫ ПЕРВОГО РАСЧЕТА



Кроме того, анализируем распределение энергии при деформировании по форме устойчивости (синяя шкала отрицательных значений показывает элементы, ответственные за потерю устойчивости)





# РЕЗУЛЬТАТЫ ВТОРОГО РАСЧЕТА

Дополнительное ребро

Structure CAD - [C:\SDATA\Moldova\Stabiliti.SPR]

Проект Файл Опции Операции Сервис Справка

Управление Схема **Назначения** Узлы и Элементы Загружения Группы

15:53:56  
Анализ устойчивости системы для загрузки 1.  
15:54:28  
Коэффициент запаса устойчивости системы 0.801086.  
15:54:31  
Вычисление форм потери устойчивости системы для загрузки 1.  
15:54:34  
При вычислении форм потери устойчивости системы превышено  
заданное  
число итераций. Достигнута точность - 0.0119  
15:54:35  
**ЗАДАНИЕ ВЫПОЛНЕНО**  
Затраченное время : 0.73 мин.

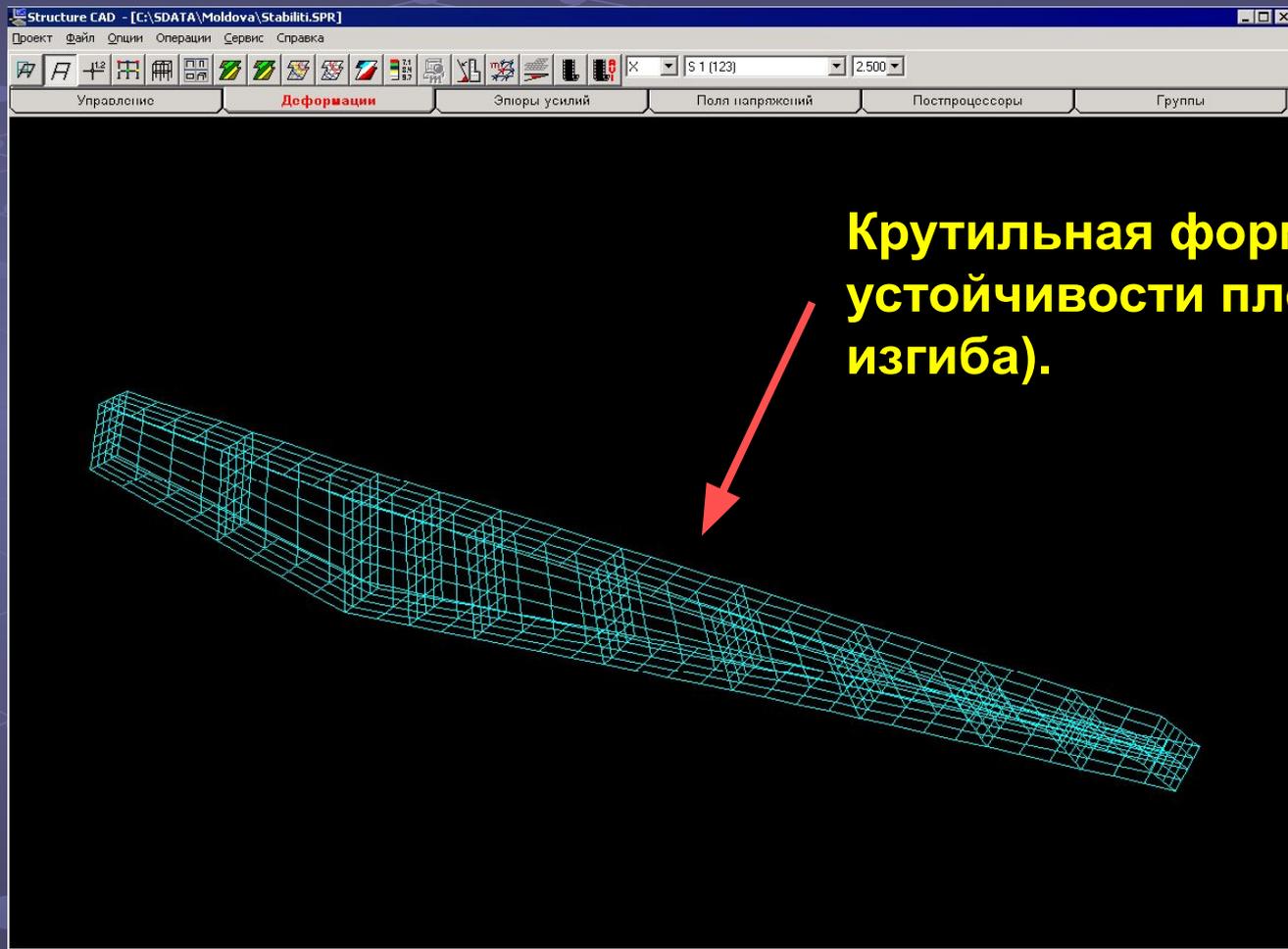
Отметка элементов

Узлов 745 Элементов 774

$K = 0,801 < 1,5$



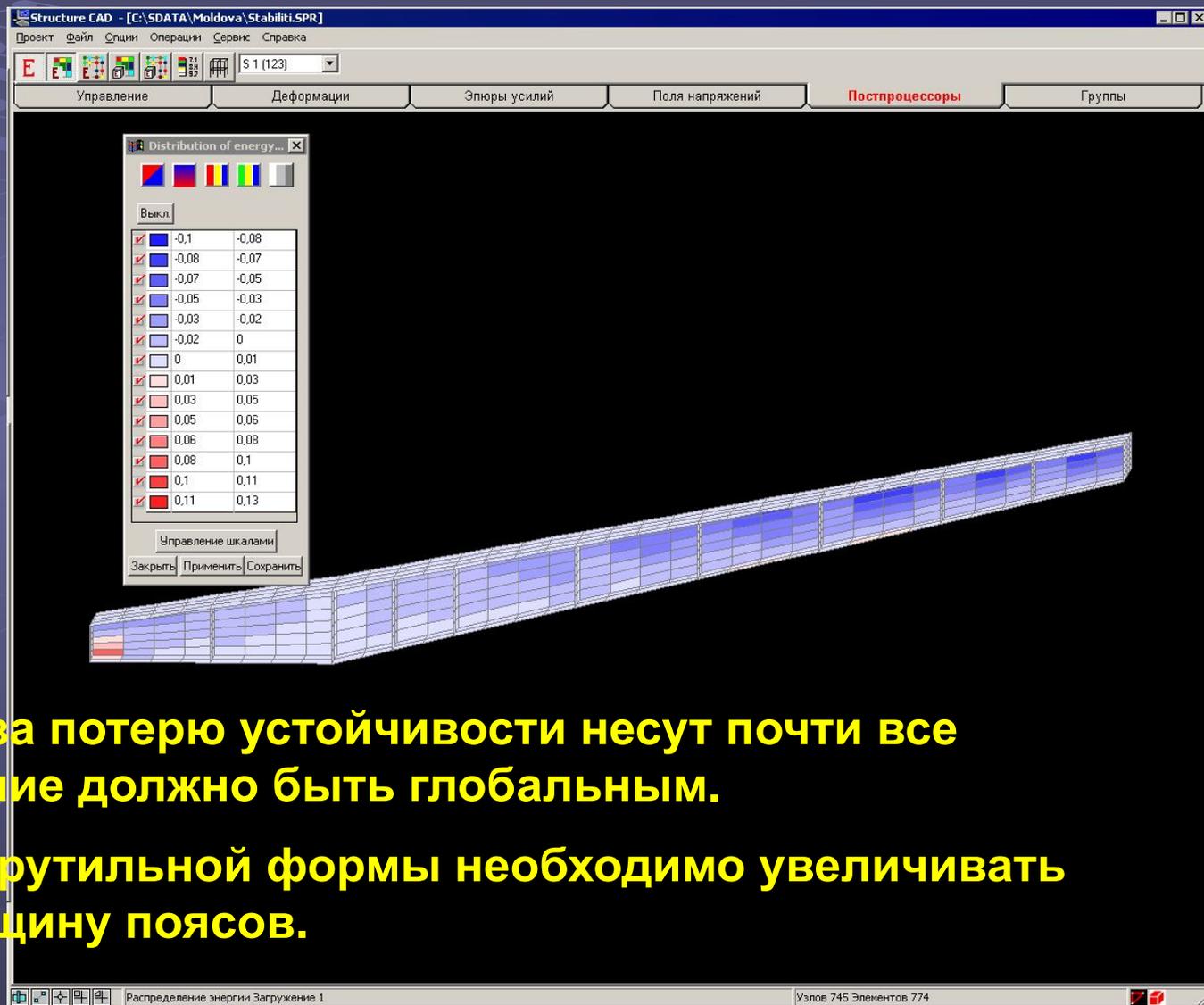
# РЕЗУЛЬТАТЫ ВТОРОГО РАСЧЕТА



Крутильная форма (потеря устойчивости плоской формы изгиба).



# РЕЗУЛЬТАТЫ ВТОРОГО РАСЧЕТА



**Ответственность за потерю устойчивости несут почти все элементы - усиление должно быть глобальным.**

**Для исключения крутильной формы необходимо увеличивать ширину и/или толщину поясов.**



# РЕЗУЛЬТАТЫ ТРЕТЬЕГО РАСЧЕТА

Structure CAD - [C:\SDATA\Moldova\Stabiliti.SPR]

Проект Файл Опции Операции Сервис Справка

Управление Схема **Назначения** Узлы и Элементы Загружения Группы

**Ширина поясов увеличена на 20%,  
толщина увеличена до 26 мм**

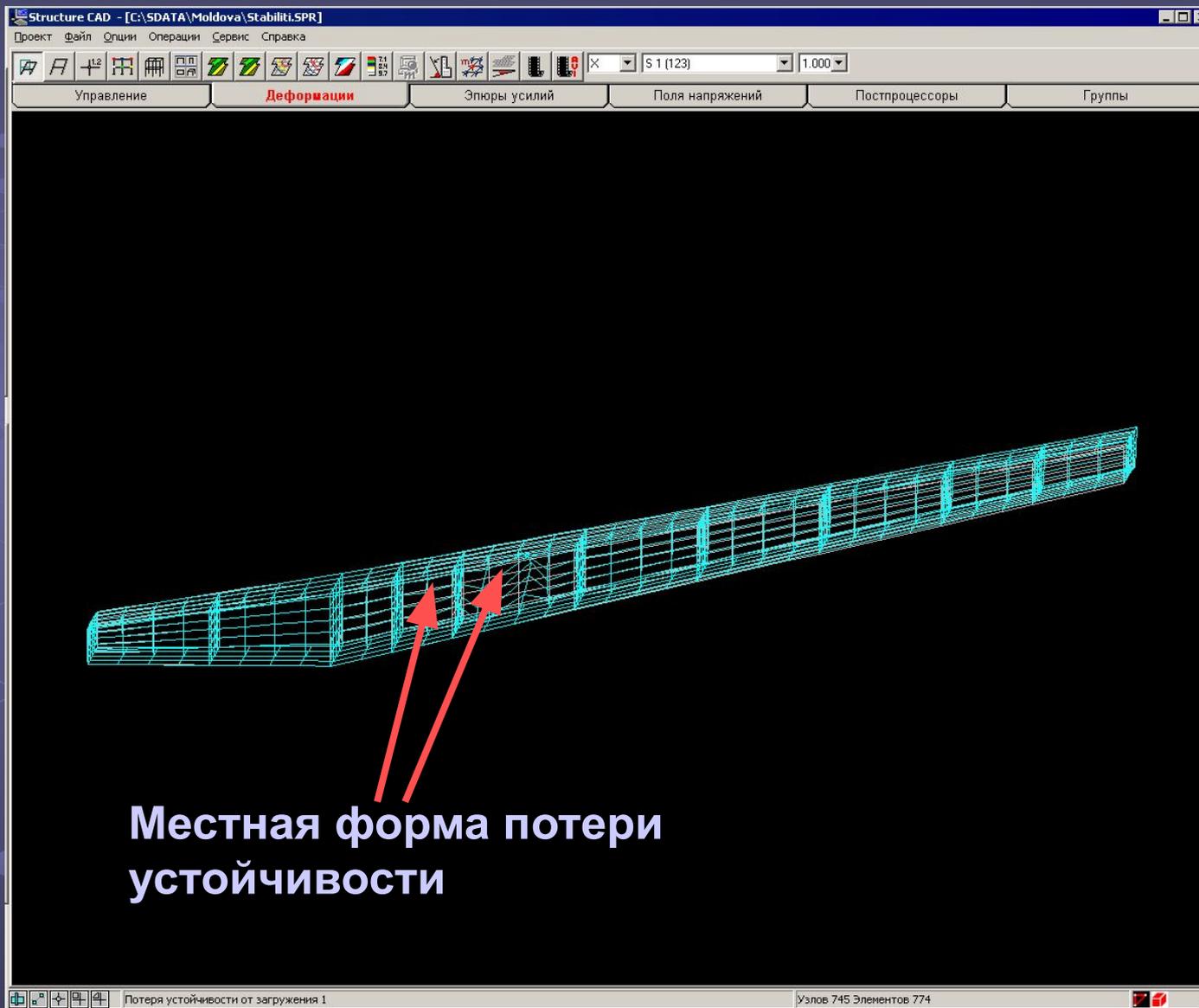
**$K = 1,476 < 1,5$**

```
16:06:51
Анализ устойчивости системы для загрузки 1.
16:07:22
Коэффициент запаса устойчивости системы 1.476288.
16:07:25
Вычисление форм потери устойчивости системы для загрузки
1.
16:07:27
При вычислении форм потери устойчивости системы превышено
заданное
число итераций. Достигнута точность - 0.0119
16:07:29
ЗАДАНИЕ ВЫПОЛНЕНО
Затраченное время : 0.68 мин.
```

Отметка элементов Узлов 745 Элементов 774



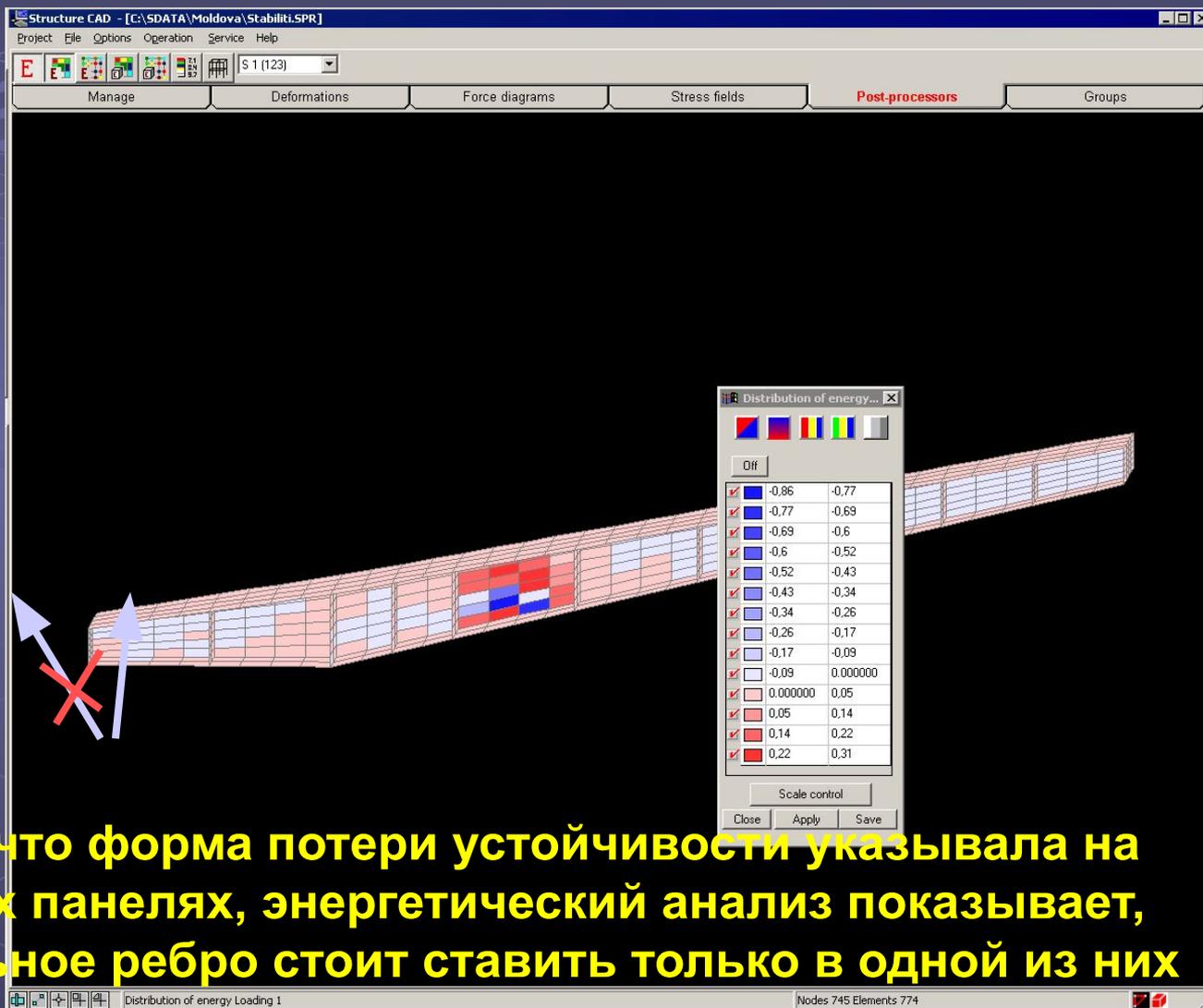
# РЕЗУЛЬТАТЫ ТРЕТЬЕГО РАСЧЕТА



**Местная форма потери устойчивости**



# РЕЗУЛЬТАТЫ ТРЕТЬЕГО РАСЧЕТА



Несмотря на то, что форма потери устойчивости указывала на проблемы в двух панелях, энергетический анализ показывает, что дополнительное ребро стоит ставить только в одной из них



# РЕЗУЛЬТАТЫ ЧЕТВЕРТОГО РАСЧЕТА

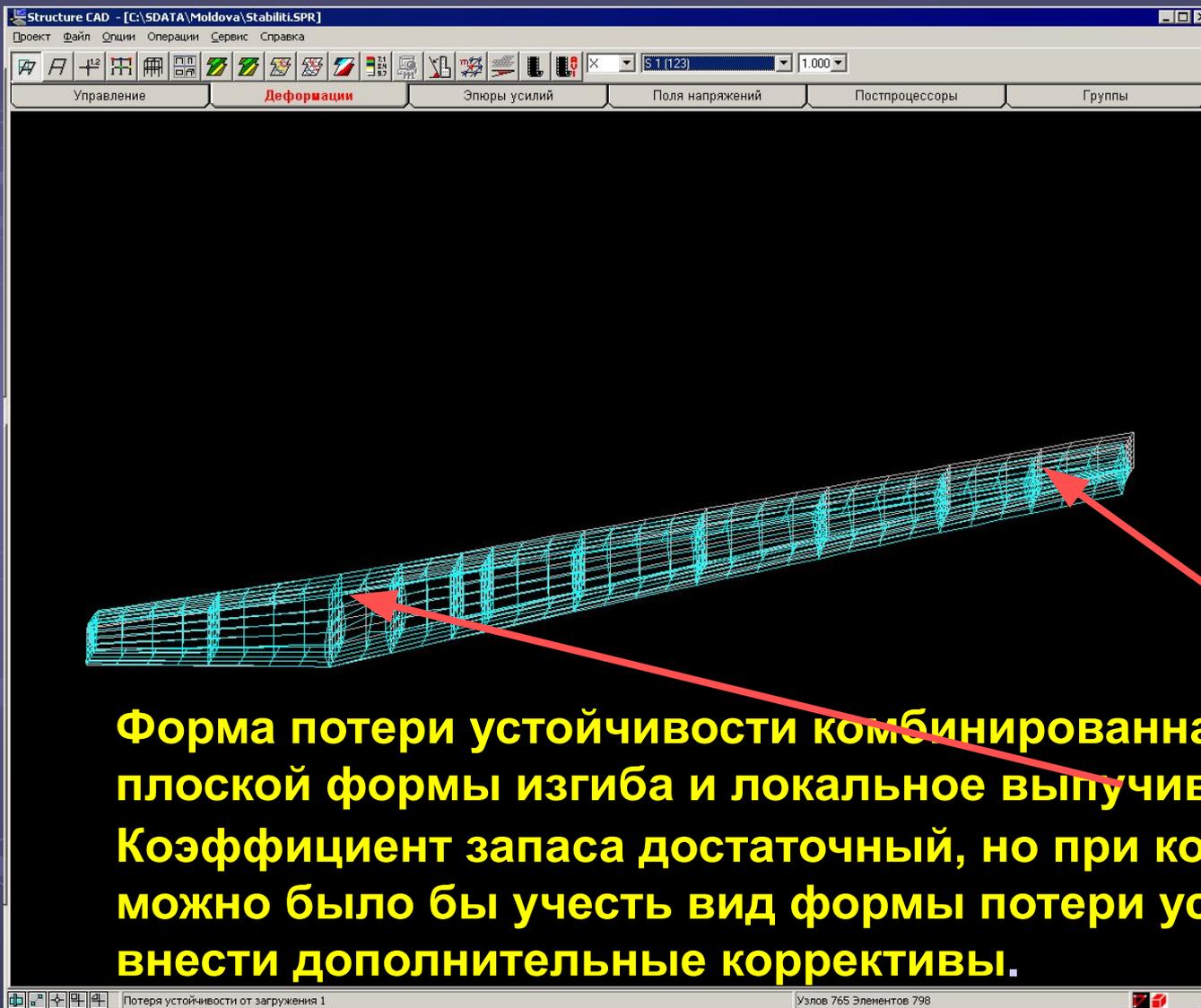
The screenshot shows the Structure LAD software interface. The main window displays a 3D wireframe model of a cylindrical structure, possibly a chimney or tower, with a grid of nodes and elements. The interface includes a menu bar (Проект, Файл, Опции, Операции, Сервис, Справка) and a toolbar with various icons. Below the toolbar are tabs for 'Управление', 'Схема', 'Назначения', 'Узлы и Элементы', 'Загрузки', and 'Группы'. A log window in the bottom right corner displays the following text:

```
16:14:09
Анализ устойчивости системы для загрузки 1.
16:14:40
Коэффициент запаса устойчивости системы 1.590729.
16:14:43
Вычисление формы потери устойчивости системы для загрузки
1.
16:14:46
При вычислении формы потери устойчивости системы превышено
заданное
число итераций. Достигнута точность - 0.0271
16:14:47
ЗАДАНИЕ ВЫПОЛНЕНО
Затраченное время : 0.72 мин.
```

**K = 1,59 > 1,5 !**



# РЕЗУЛЬТАТЫ ЧЕТВЕРТОГО РАСЧЕТА



**Форма потери устойчивости комбинированная – нарушение плоской формы изгиба и локальное выпучивание стенки. Коэффициент запаса достаточный, но при конструировании можно было бы учесть вид формы потери устойчивости и внести дополнительные коррективы.**



# 3. ПРОВЕРКА ОБЩЕЙ УСТОЙЧИВОСТИ ЗДАНИЯ



# ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

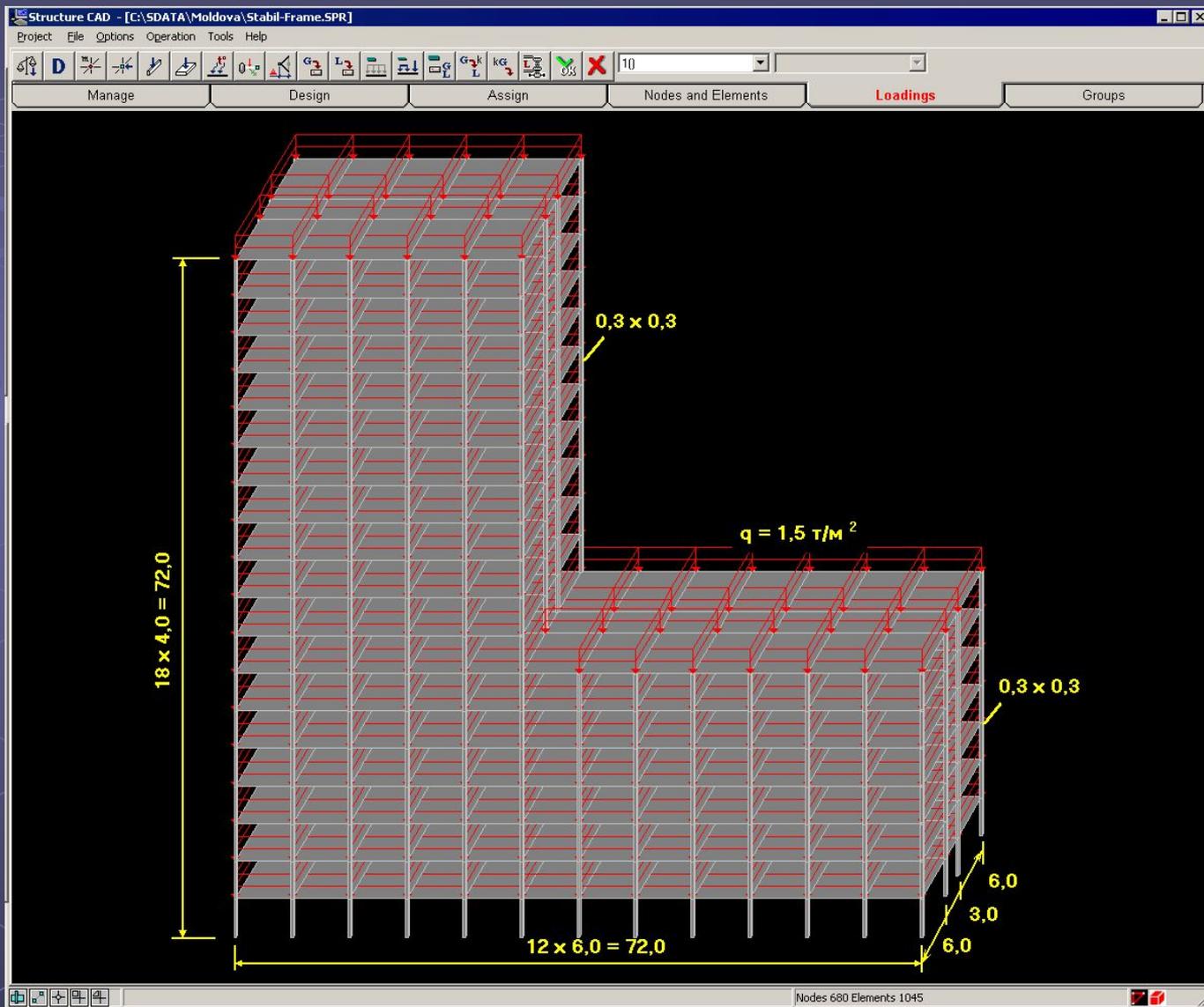
При проверке общей устойчивости высотных зданий до сих пор используется методика Ханджи, разработанная более 25 лет тому назад с использованием ряда упрощений для ручного счета. Она пригодна только для зданий простой параллелепипедной конфигурации.

Комплекс SCAD позволяет выполнить такую проверку для сооружения произвольной формы.



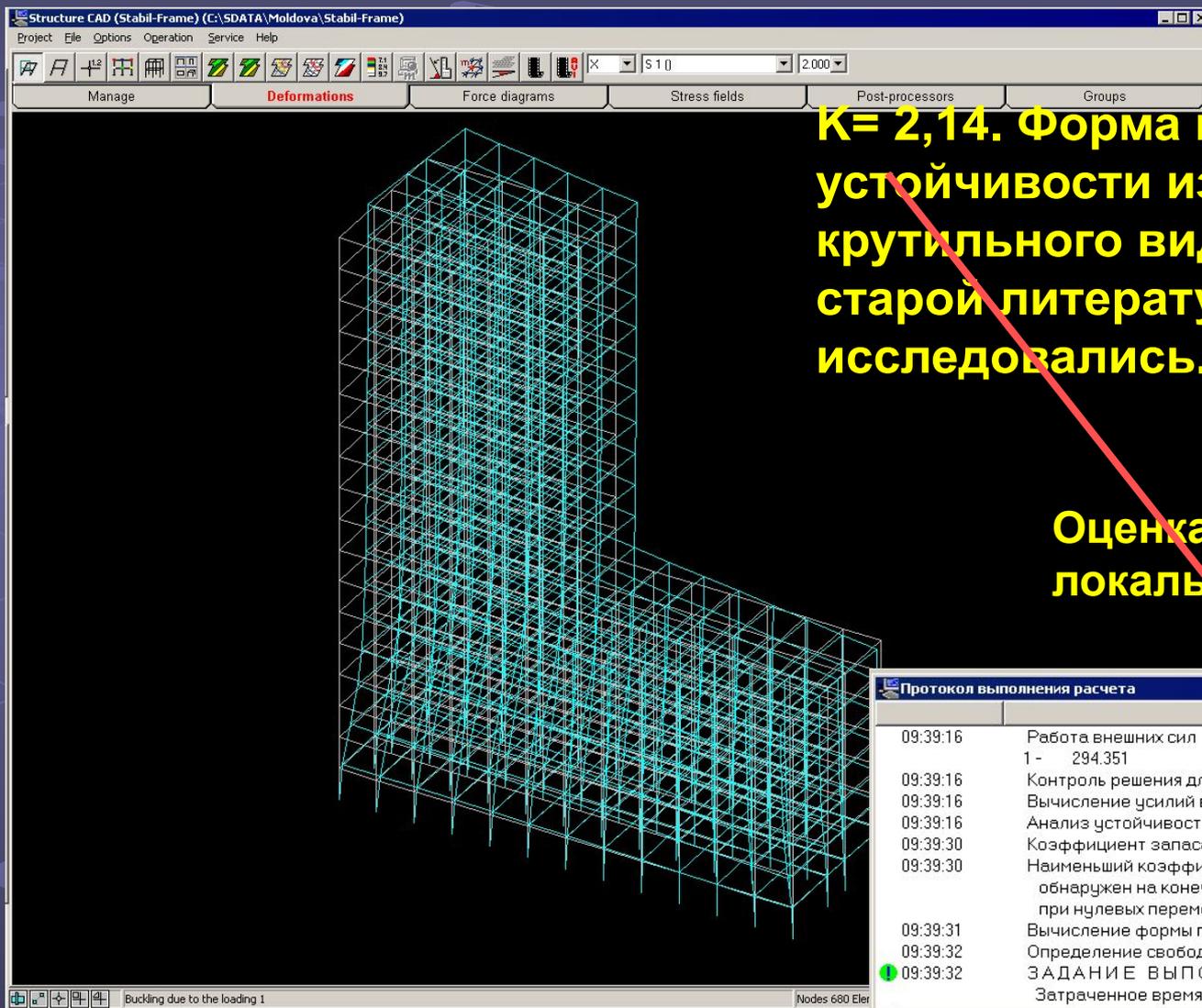
Проверка устойчивости

# РАСЧЕТНАЯ МОДЕЛЬ



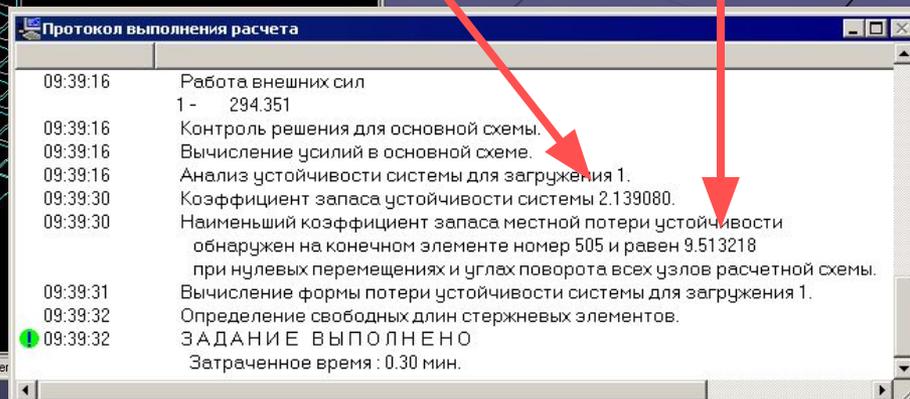


# ОБЩАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ ЗДАНИЯ



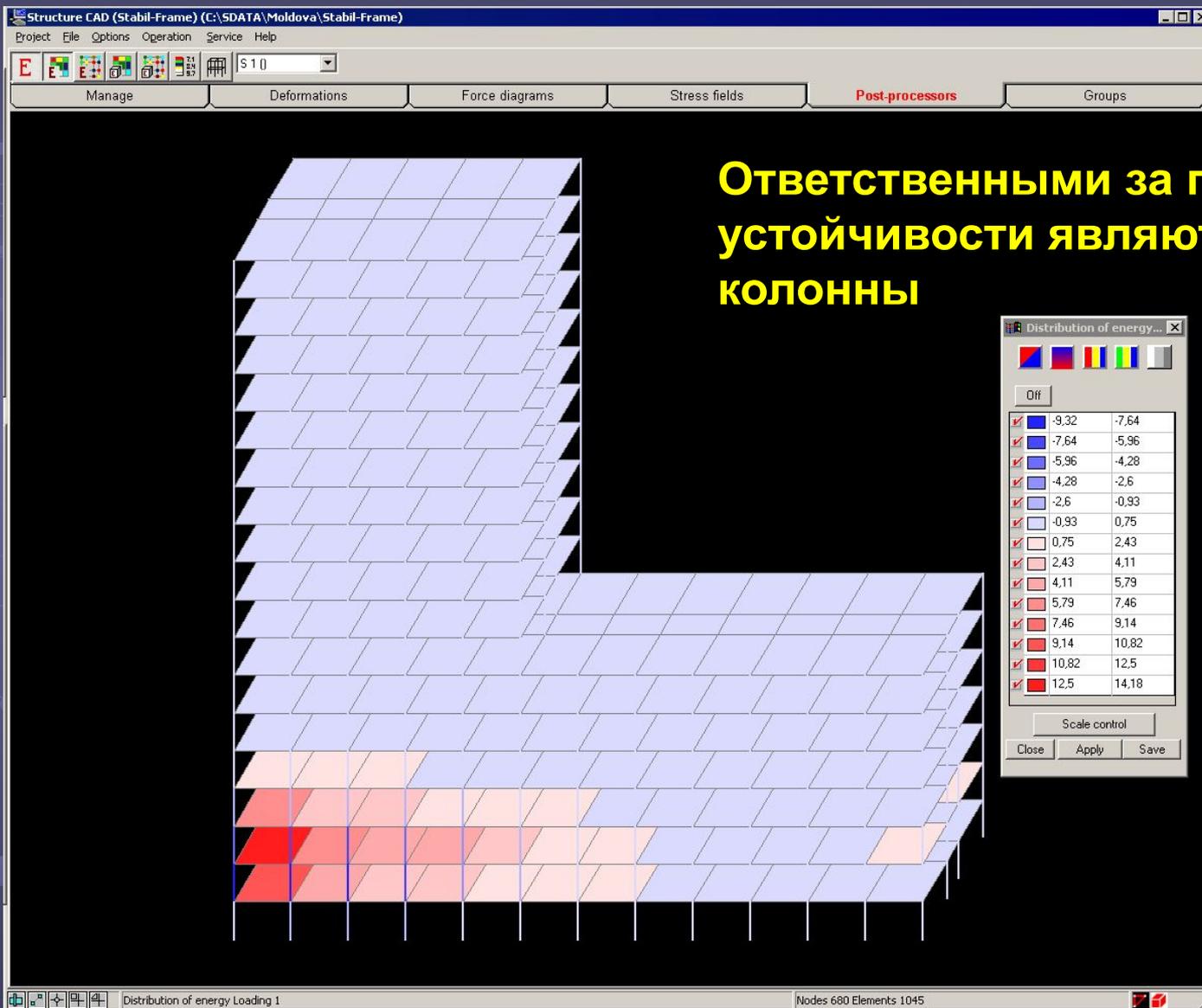
**$K=2,14$ . Форма потери устойчивости изгибно-крутильного вида. Такие формы в старой литературе не исследовались.**

**Оценка возможностей по локальному выпучиванию**



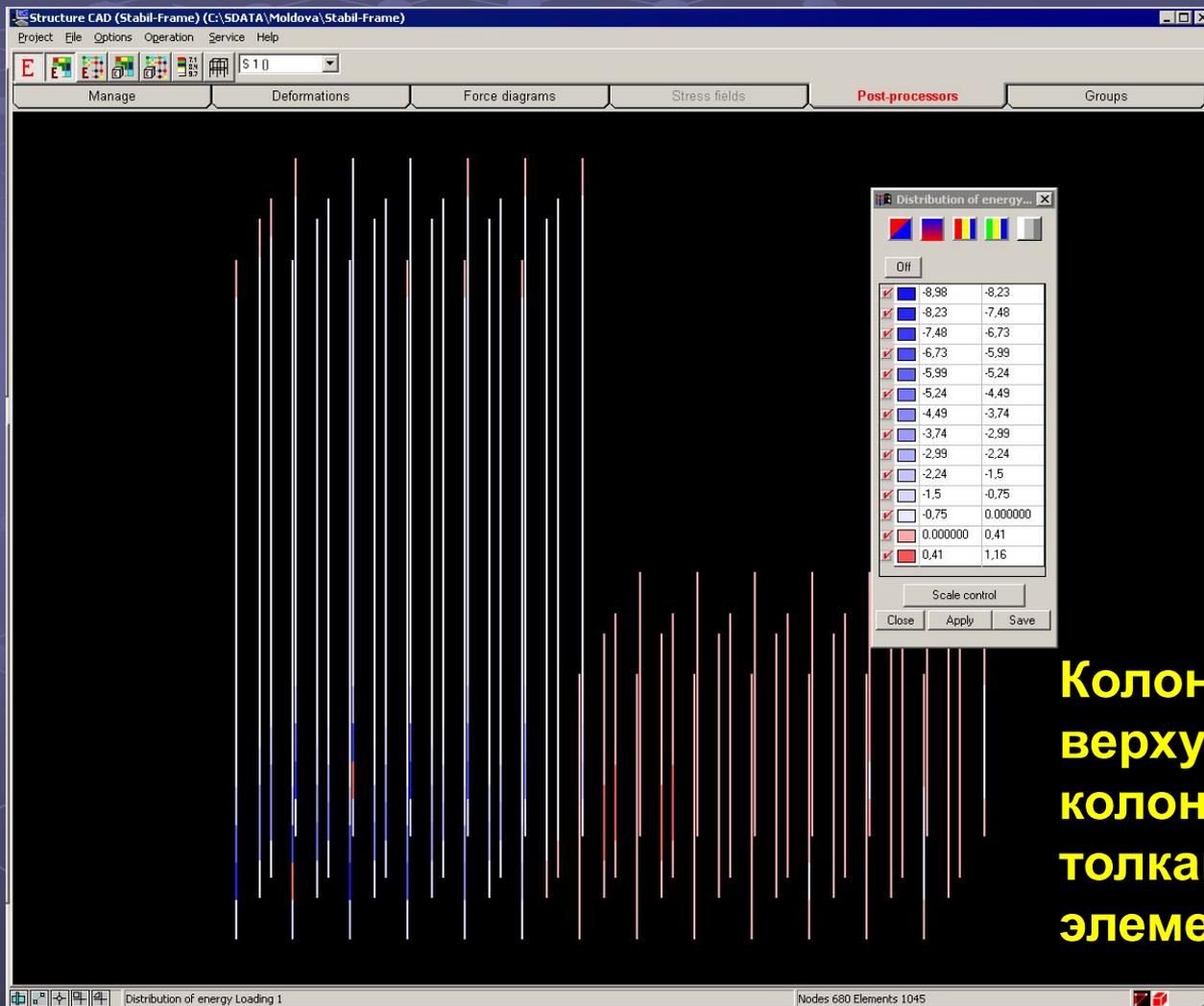


# ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ КАРТИНА (ВСЕ)





# ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ КАРТИНА (КОЛОНЫ)



**Колонны низкой части и  
верхушки высоких  
колон не являются  
толкающими  
элементами**



# СВОБОДНЫЕ ДЛИНЫ

Stabil-Frame.P19 - WordPad

File Edit View Insert Format Help

Courier New 10 Cyrillic

Разработан SCAD Group (Украина, Киев)  
 Wed Sep 11 09:47:16 2002 Stabil-Frame основная схема 19.0001

---

С В О Б О Д Н Ы Е   Д Л И Н Ы   Э Л Е М Е Н Т О В

---

005_	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
	1	14	27	40	53	66	79	92	105	118	131
	14	27	40	53	66	79	92	105	118	131	144

---

1 - ( 2.139081 )

LY	6.726	6.893	7.082	7.292	7.527	7.793	8.095	8.439	8.833	9.296	9.847
LZ	6.726	6.893	7.082	7.292	7.527	7.793	8.095	8.439	8.833	9.296	9.847

---

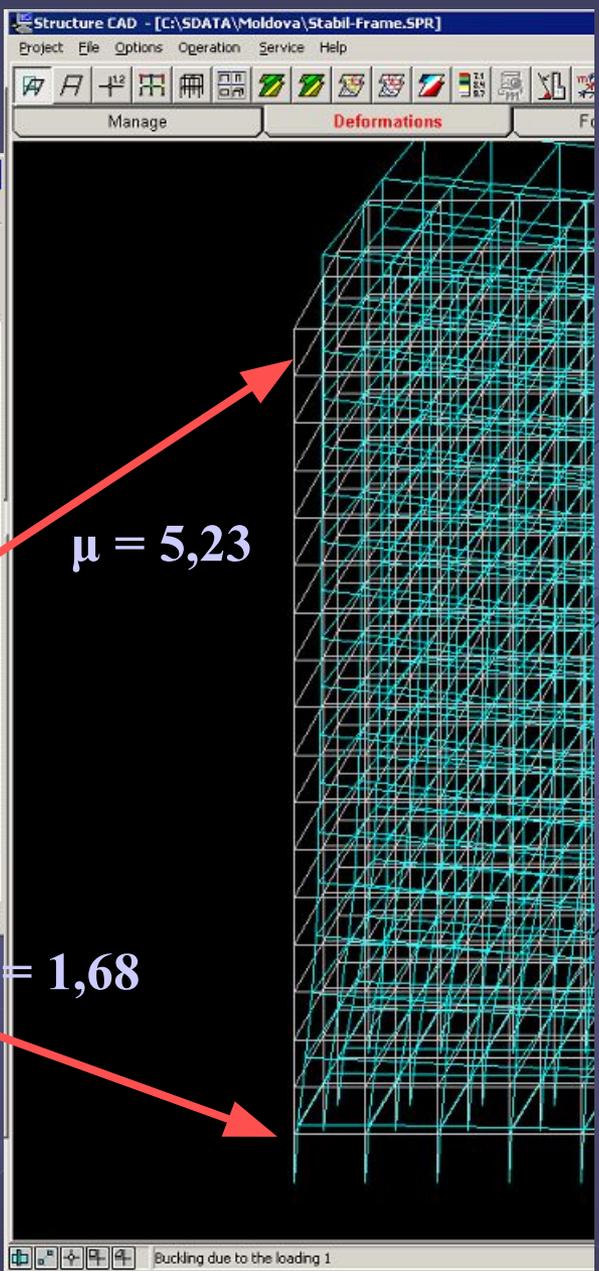
005_	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
	144	157	170	183	196	209	222	2	15	28	41
	157	170	183	196	209	222	235	15	28	41	54

---

1 - ( 2.139081 )

LY	10.51	11.35	12.44	13.92	16.12	19.05	28.91	5.016	5.158	5.314	5.485
----	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

For Help, press F1



$\mu = 5,23$

$\mu = 1,68$

Наличие удерживающей системы привело к появлению больших расчетных длин. Их использование для проверки устойчивости закономерно, но проверку гибкости проводить не рекомендуется.



# ПРЕДУПРЕЖДЕНИЕ

Если в расчетную схему были включены вспомогательные элементы для сбора нагрузок (как правило – малой жесткости), то при проверке устойчивости они могут показать очень малую величину коэффициента запаса за счет локального выпучивания.

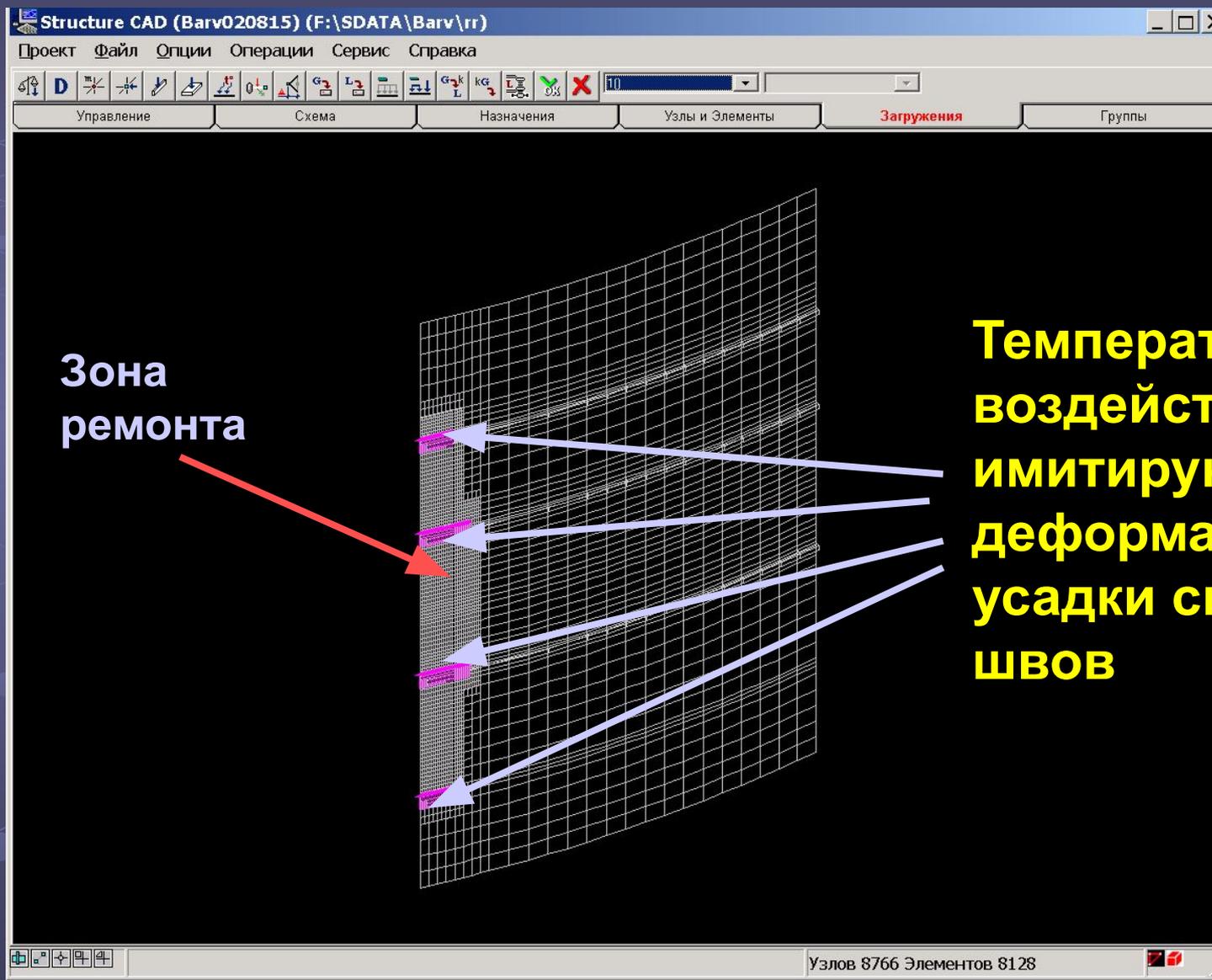
**Удалите такие элементы из расчетной схемы и задайте нагрузку другим способом, если вы хотите использовать режим проверки устойчивости.**



# 4. ПРОВЕРКА УСТОЙЧИВОСТИ СТЕНКИ РЕЗЕРВУАРА



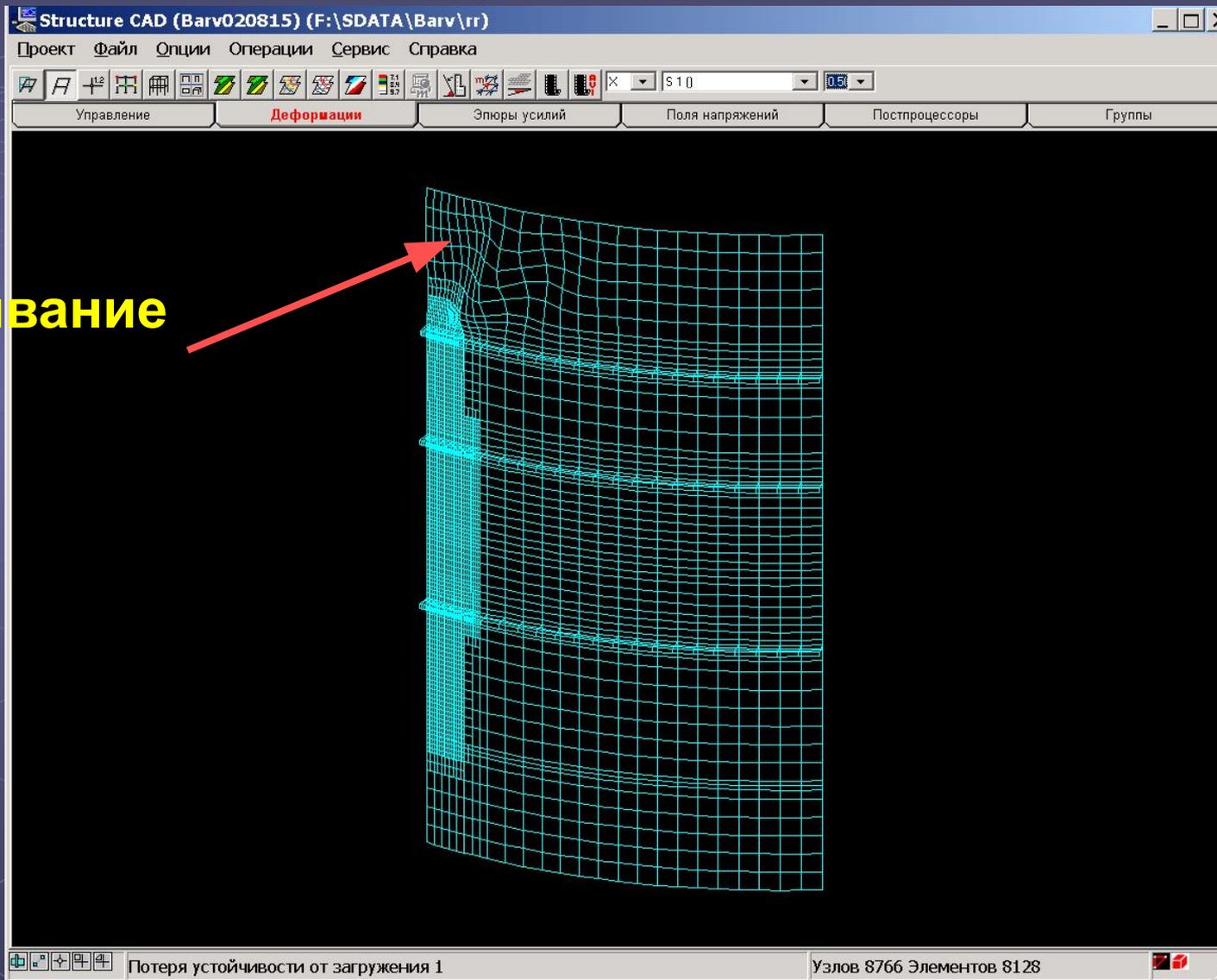
# РАСЧЕТНАЯ СХЕМА





# ФОРМА ПОТЕРИ УСТОЙЧИВОСТИ

Выпучивание  
стенки





# РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГИИ

Structure CAD (Barv020815) (F:\SDATA\Barv\rr)

Проект Файл Опции Операции Сервис Справка

Управление Деформации Эпюры усилий Поля напряжений **Постпроцессоры** Группы

S10

Распределение энерг...

Выкл.

<input checked="" type="checkbox"/>	■	-0.0619	-0.0545
<input checked="" type="checkbox"/>	■	-0.0545	-0.047
<input checked="" type="checkbox"/>	■	-0.047	-0.0396
<input checked="" type="checkbox"/>	■	-0.0396	-0.0322
<input checked="" type="checkbox"/>	■	-0.0322	-0.0248
<input checked="" type="checkbox"/>	■	-0.0248	-0.0174
<input checked="" type="checkbox"/>	■	-0.0174	-0.01
<input checked="" type="checkbox"/>	■	-0.01	-0.0026
<input checked="" type="checkbox"/>	■	-0.0026	0.0048
<input checked="" type="checkbox"/>	■	0.0048	0.0122
<input checked="" type="checkbox"/>	■	0.0122	0.0196
<input checked="" type="checkbox"/>	■	0.0196	0.027
<input checked="" type="checkbox"/>	■	0.027	0.0344
<input checked="" type="checkbox"/>	■	0.0344	0.0418

Управление шкалами

Заккрыть Применить Сохранить

Распределение энергии Загружение 1

Узлов 8766 Элементов 8128



Проверка устойчивости

# Спасибо за внимание

**SCAD Soft**

**Тел. (044) 243-8351**

**e-mail: [scad@scadsoft.com](mailto:scad@scadsoft.com)**

**<http://www.scadsoft.com>**