

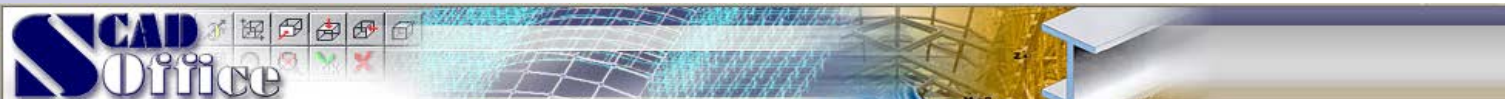
*Международный научно-практический семинар
«Расчет и проектирование конструкций в среде SCAD Office 21»
Москва, 17-18 апреля 2018*



Область несущей способности как *интерактивный инструмент анализа* в SCAD Office

*Игорь ГАВРИЛЕНКО, Сергей ГИРЕНКО
Эдуард КРИКСУНОВ, Анатолий ПЕРЕЛЬМУТЕР
Михаил ПЕРЕЛЬМУТЕР, Виталина ЮРЧЕНКО*

SCAD Soft, Киев, Украина



Область несущей способности

как интерактивный инструмент анализа в SCAD Office

Область несущей способности сечений

Требования норм проектирования (условия прочности, общей и местной устойчивости, и т.п.), предъявляемые к некоторому расчетному сечению конструкции, можно записать в виде некоторого набора ограничений-неравенств:

$$\Phi(\vec{S}) \leq 1;$$

или

$$\left\{ \begin{array}{l} f_1(S_1, S_2, \dots, S_n) \leq 1; \\ f_2(S_1, S_2, \dots, S_n) \leq 1; \\ \dots \\ f_j(S_1, S_2, \dots, S_n) \leq 1; \\ \dots \\ f_m(S_1, S_2, \dots, S_n) \leq 1; \end{array} \right.$$

где:

$\vec{S} = \{S_1, S_2, \dots, S_n\}$ - значения внутренних усилий, которые могут возникать в рассматриваемом сечении от действия расчетных комбинаций нагрузений;
 n - общее количество возможных внутренних усилий в сечении;
 m - количество неравенств, описывающих требования норм проектирования;

Значение левой части неравенства $\xi_j = f_j(S_1, S_2, \dots, S_n)$ будем называть коэффициентом использования ограничения.

Область несущей способности

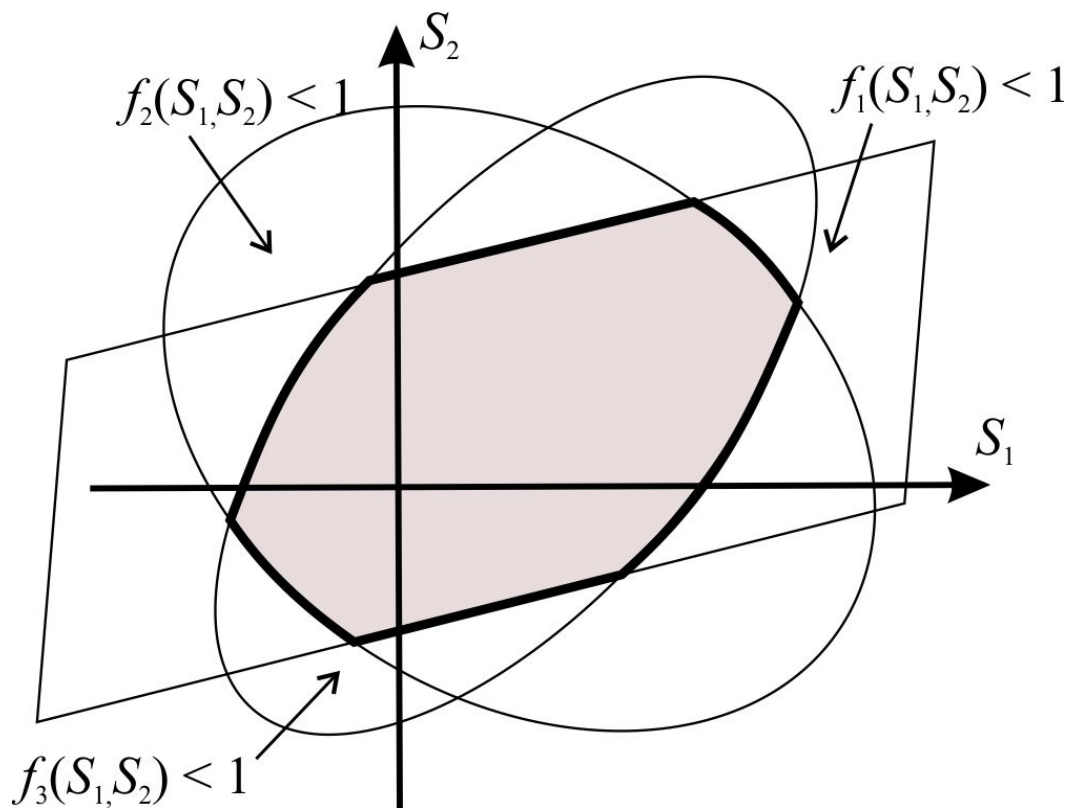
как интерактивный инструмент анализа в SCAD Office

Область несущей способности сечений

Каждое нормативное требование $f_j(\vec{S}) \leq 1$ определяет некоторую область в n -мерном пространстве внутренних усилий, а пересечение всех $\Phi(\vec{S}) \leq 1$ нормативных неравенств образует **область несущей способности сечения** Ω_s в терминах рассматриваемых норм проектирования.

Для каждой точки области несущей способности сечения **максимальный коэффициент использования ограничений**:

$$\xi_{\max} = \max \{ \xi_j | j = \overline{1, m} \} \leq 1$$



Формирование области несущей способности сечения в двухмерном пространстве внутренних усилий (пример)

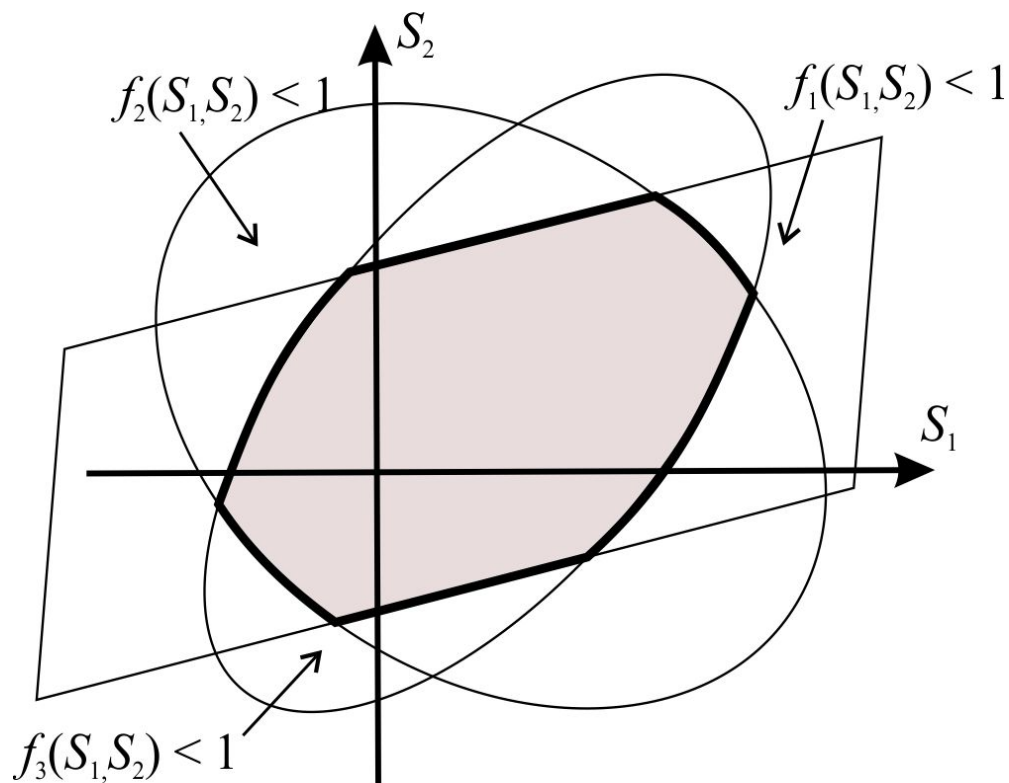
Область несущей способности

как интерактивный инструмент анализа в SCAD Office

Область несущей способности сечений

Областью несущей способности сечения Ω_s будем называть некоторую область в n -мерном пространстве внутренних усилий, все точки которой соответствуют такому сочетанию этих внутренних усилий, под действием которых сечение будет удовлетворять **всем нормативным требованиям**.

Границей области несущей способности сечений являются не только условия прочности сечения, но и **весь набор ограничений**, регламентируемых требованиями норм.



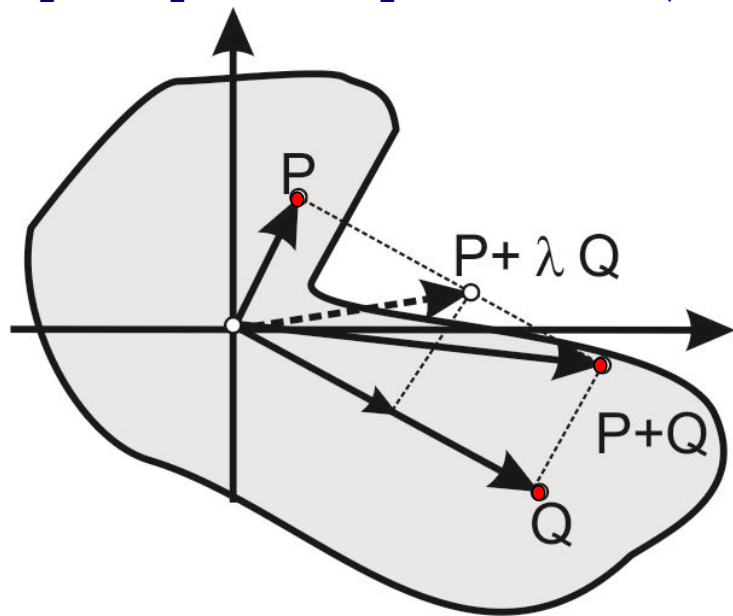
Формирование области несущей способности сечения в двухмерном пространстве внутренних усилий (пример)

Область несущей способности

как интерактивный инструмент анализа в SCAD Office

Свойства области несущей способности сечения

Одним из важнейших свойств области несущей способности является ее **ВЫПУКЛОСТЬ**. Выпуклость области несущей способности сечения дает нам право в линейном расчете ограничиться проверками такого сечения на действие только тех сочетаний внутренних усилий в сечении, для которых характерны экстремальные (минимальные или максимальные) значения.



Это правило целиком справедливо для выпуклой области несущей способности, в то время, как для невыпуклой области невыгодным может оказаться сочетание с промежуточными (не экстремальными) значениями внутренних усилий.

Проверка сечения на комбинацию нагрузок с «не экстремальными» значениями

Область несущей способности

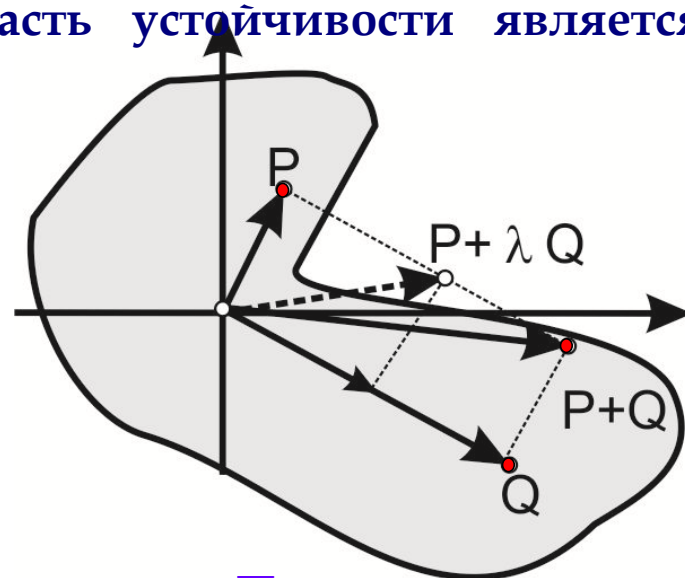
как интерактивный инструмент анализа в SCAD Office

Свойства области несущей способности сечения

В инженерной среде существует устойчивое мнение, что область несущей способности сечения является выпуклой, что базируется на:

- согласно постулату Друкера для идеальной упруго пластической системы граничная поверхность текучести является выпуклой в пространстве внутренних усилий;
- согласно теореме Папковича П. Ф. область устойчивости является выпуклой в пространстве нагрузок на систему.

Эти положения **не соответствуют свойствам области несущей способности сечения**, которая целиком определяется нормами проектирования. В нормах проектирования не используется ни **классическая теория пластичности**, для которой справедлив постулат Друкера, ни **бифуркационная теория устойчивости равновесия**, для которой доказана теорема Папковича П. Ф.

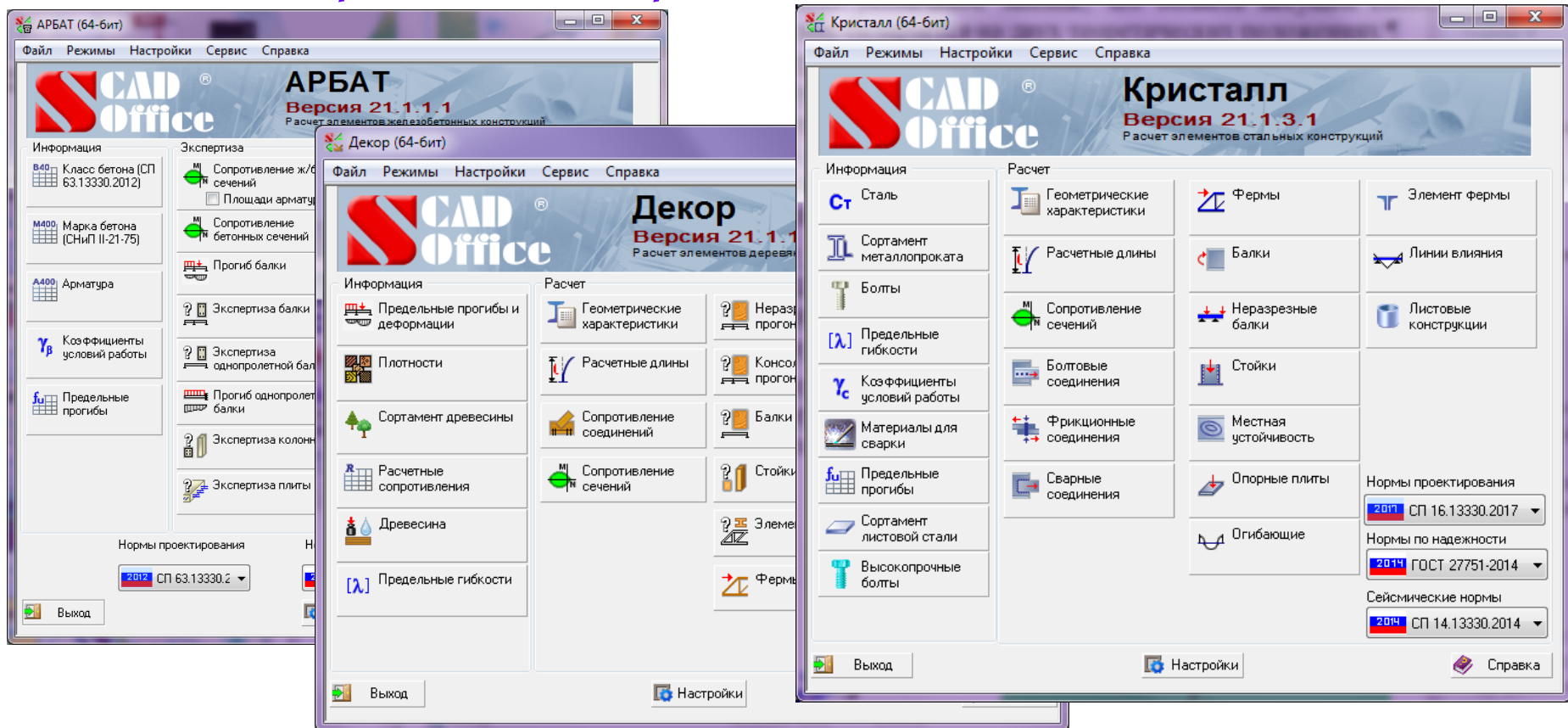


Проверка сечения на комбинацию нагрузок с «неэкстремальными» значениями

Область несущей способности

как интерактивный инструмент анализа в SCAD Office

Автоматизированное построение области



Автоматизированное построение областей несущей способности для сечений стержневых элементов железобетонных, деревянных и стальных конструкций предусмотрено программами **АРБАТ**, **ДЕКОР** и **КРИСТАЛЛ**

Область несущей способности

как интерактивный инструмент анализа в SCAD Office

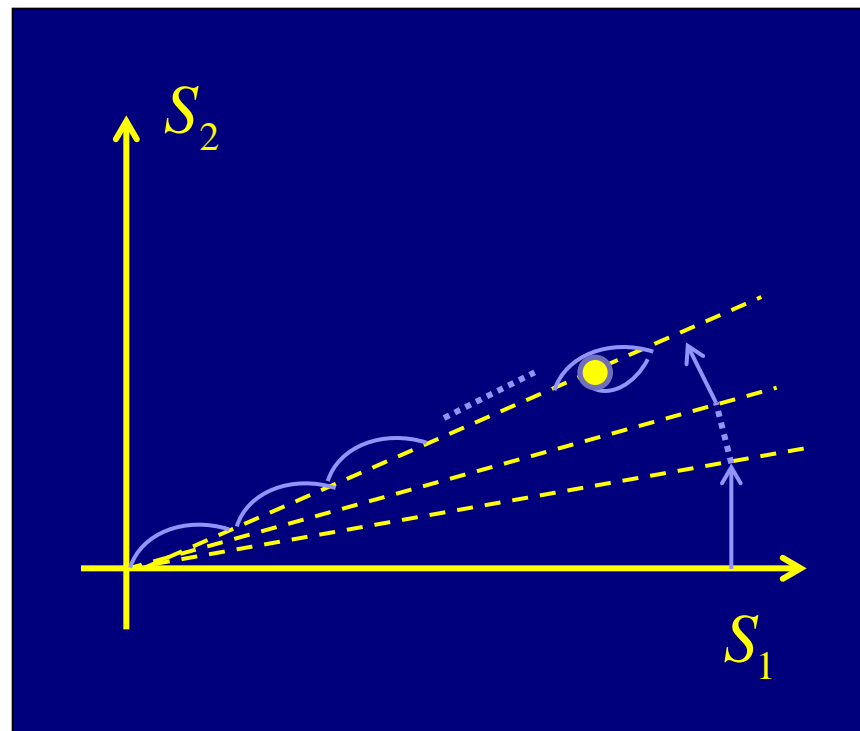
Автоматизированное построение области

Автоматизированное построение двумерной проекции области несущей способности выполняется в координатной системе пары внутренних усилий, выбранной пользователем.

При некотором фиксированном значении отношения внутренних усилий (на луче e) разыскивается наиболее отстоящая от начала координат точка, где выполняются все требования норм. Для такой точки

$$\xi_{\max} = \max\{\xi_j | j = \overline{1, m}\} = 1,$$

поэтому она принадлежит границе области несущей способности.



Область несущей способности

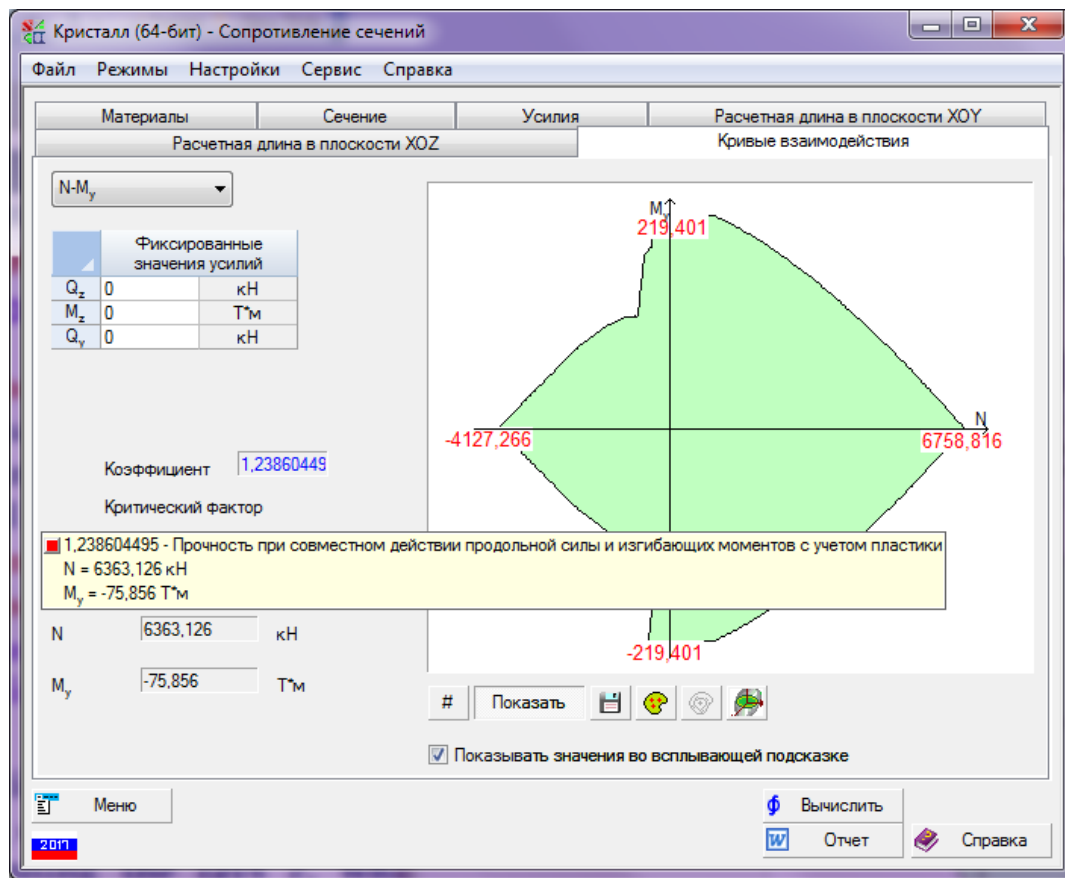
как интерактивный инструмент анализа в SCAD Office

Автоматизированное построение области

Вся граница области несущей способности строится путем перебора лучей e , которые меняют свое значение не реже, чем 1° .

Таким способом строятся двумерные ортогональные проекции области несущей способности для любой выбранной пользователем пары внутренних усилий.

Важно помнить, что область это не картина реального поведения конструкции, а отображение точки зрения норм на поведение конструкции. Поэтому для различных норм она выглядит по-разному!



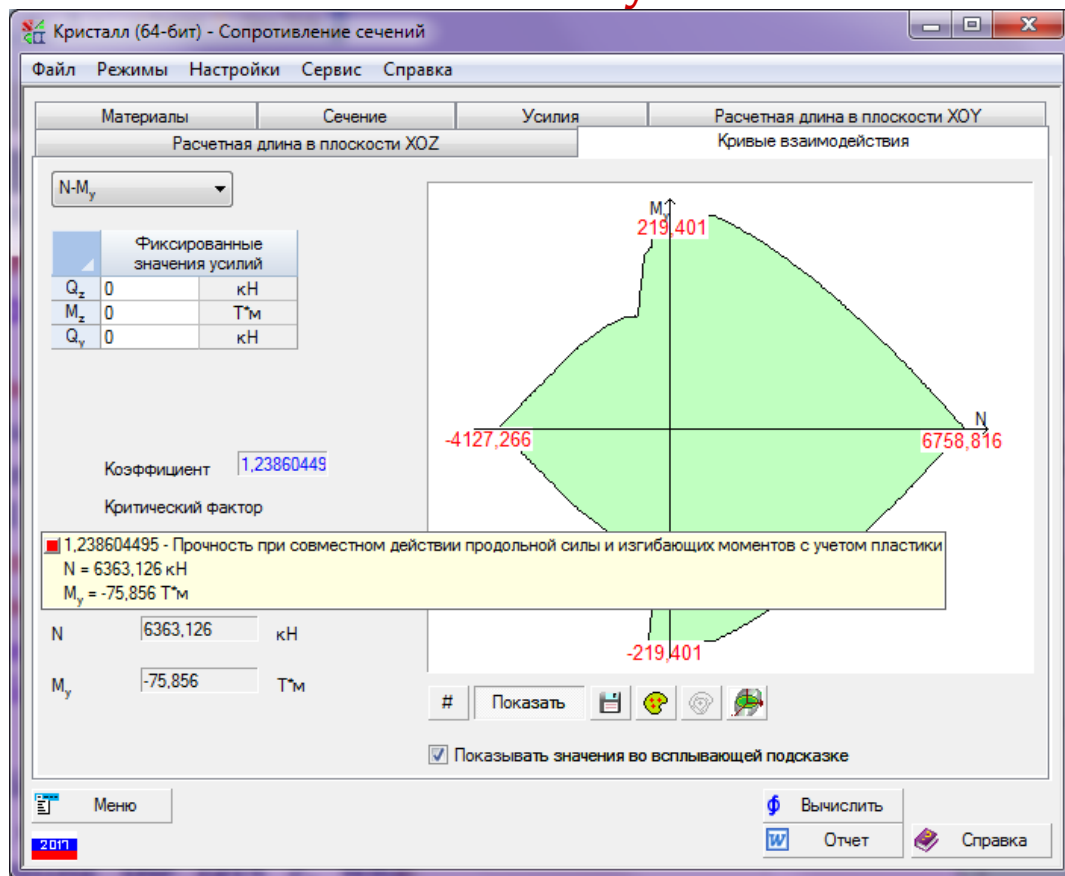
Область несущей способности

как интерактивный инструмент анализа в SCAD Office

Интерактивный режим исследования области

Построенная область является **ИНТЕРАКТИВНЫМ ИНСТРУМЕНТОМ** общения с пользователем.

С помощью курсора мыши можно обследовать двухмерную проекцию области. В зависимости от изменения положения курсора (изменения соответствующей пары внутренних усилий) выводится максимальное значение коэффициента использования ограничений ξ_{\max} , соответствующее этим усилиям, а также тип нормативной проверки, для которой он вычислен.



Интерактивный режим исследования области несущей способности

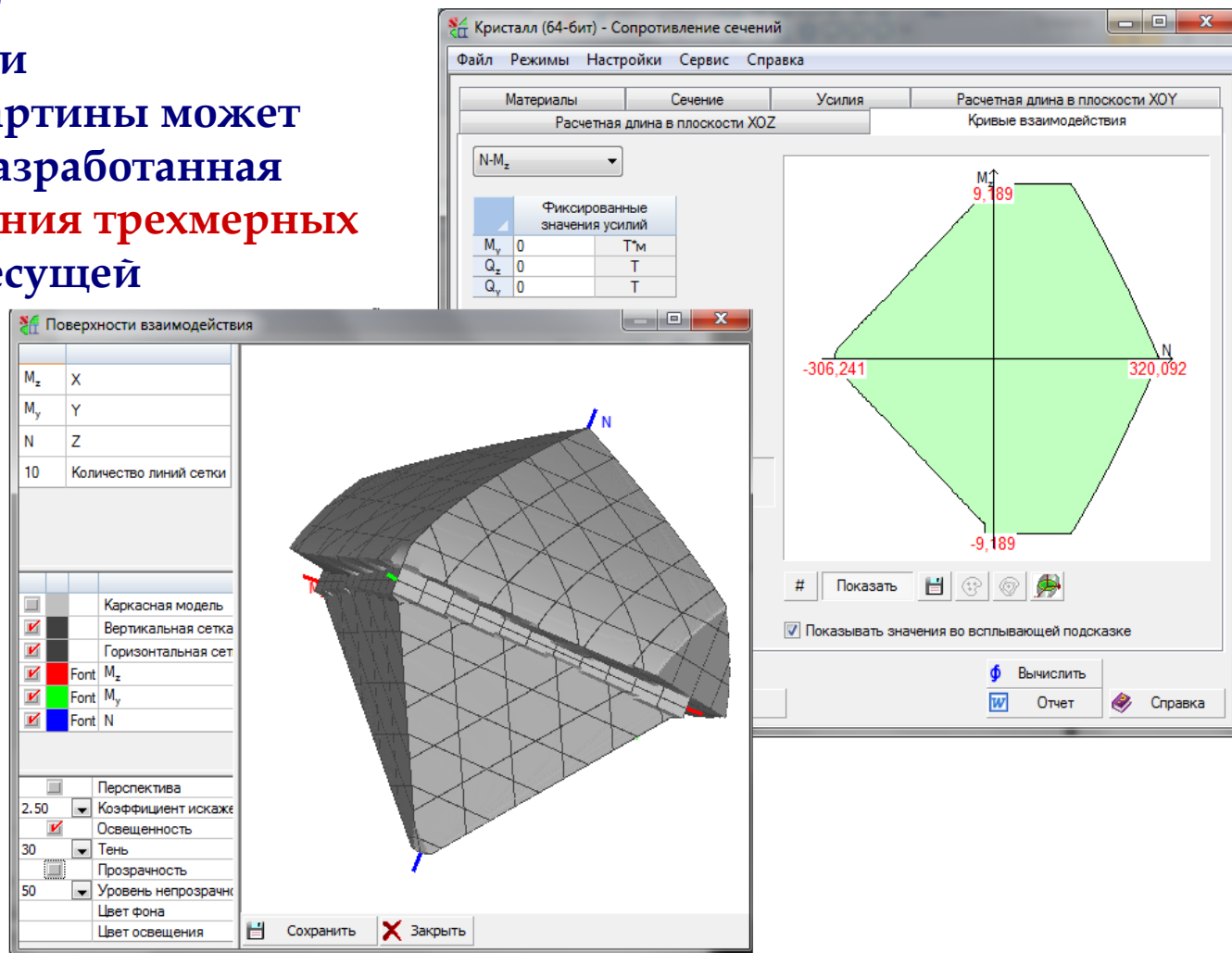
Область несущей способности

как интерактивный инструмент анализа в SCAD Office

Интерактивный режим исследования области

Помощь в понимании пространственной картины может оказать только что разработанная функция представления трехмерных проекций области несущей способности.

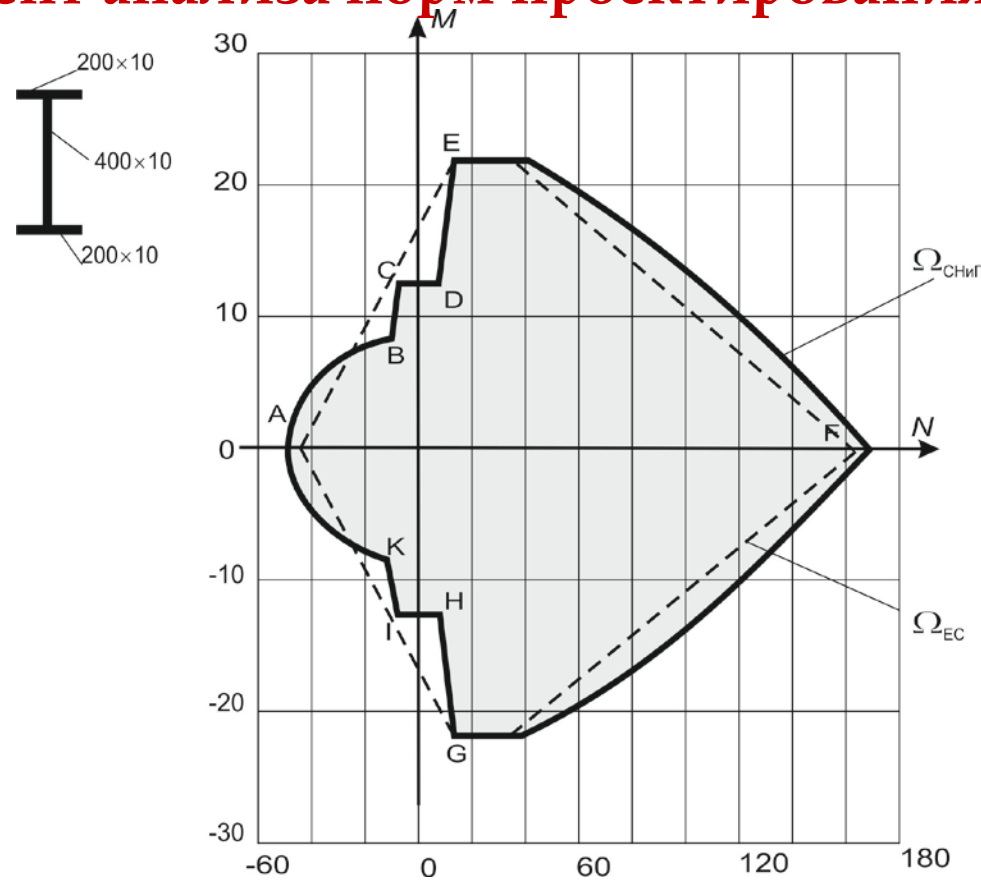
Предусмотрена возможность выбрать тройку усилий, вращать изображение, менять освещенность и густоту сетки и др.



Область несущей способности сечения

как интерактивный инструмент анализа норм проектирования

Форма области несущей способности сечения, а также характер ее границ позволяет во многих случаях более детально проанализировать требования норм проектирования, нежели это удастся сделать другими способами. Анализ границ области позволяет выполнить проверку непротиворечивости, согласованности и полноты нормативных требований. При этом легко выявляются противоречивость отдельных положений нормативного документа.



Область несущей способности сечения:

$\Omega_{\text{СНИП}}$ - согласно СП 16.13330.2011;

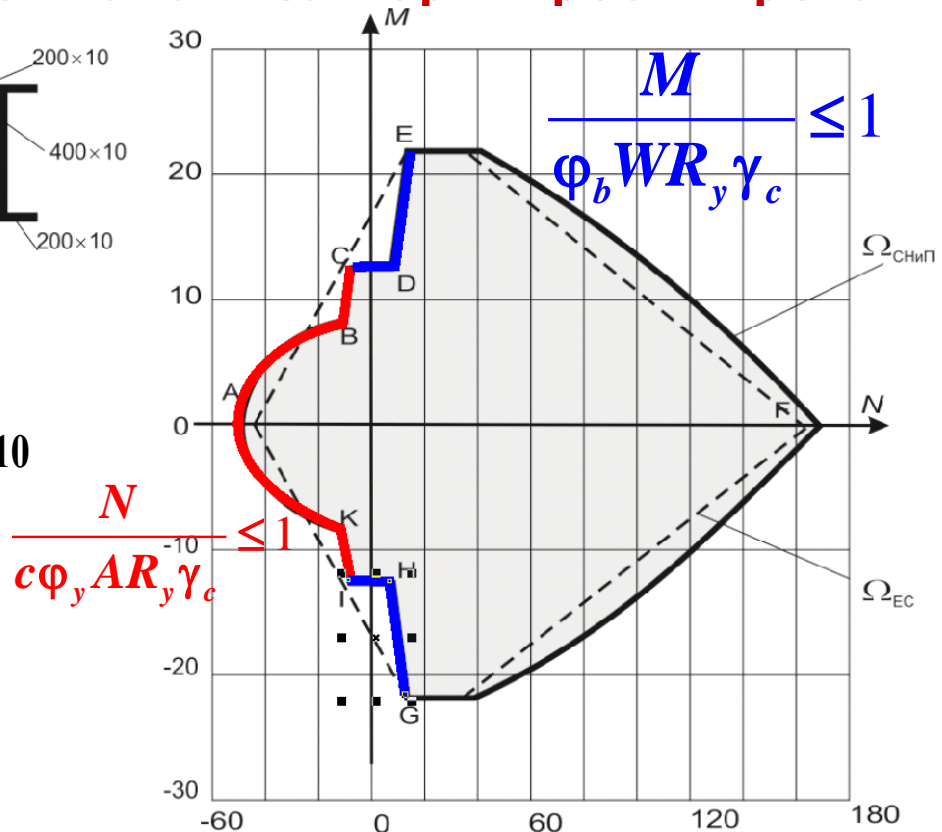
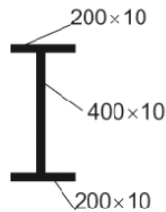
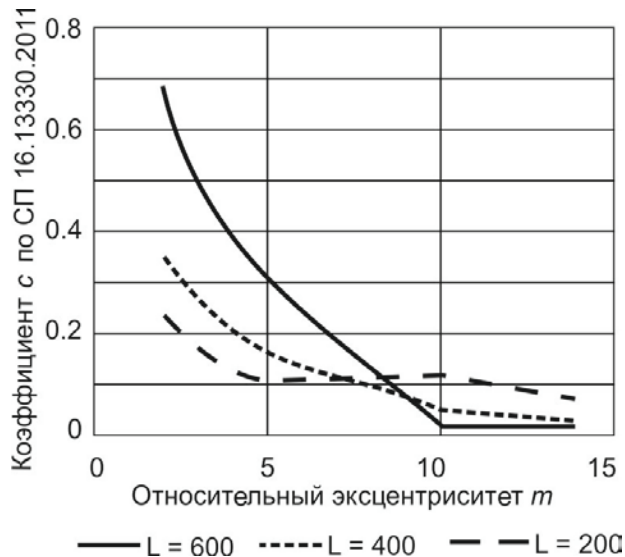
$\Omega_{\text{ЕС}}$ - согласно EN 1993-1-1

Область несущей способности сечений

как интерактивный инструмент анализа норм проектирования

Невыпуклость красного участка границы области обусловлена негладкостью сопряжения используемых аппроксимационных зависимостей для коэффициента c :

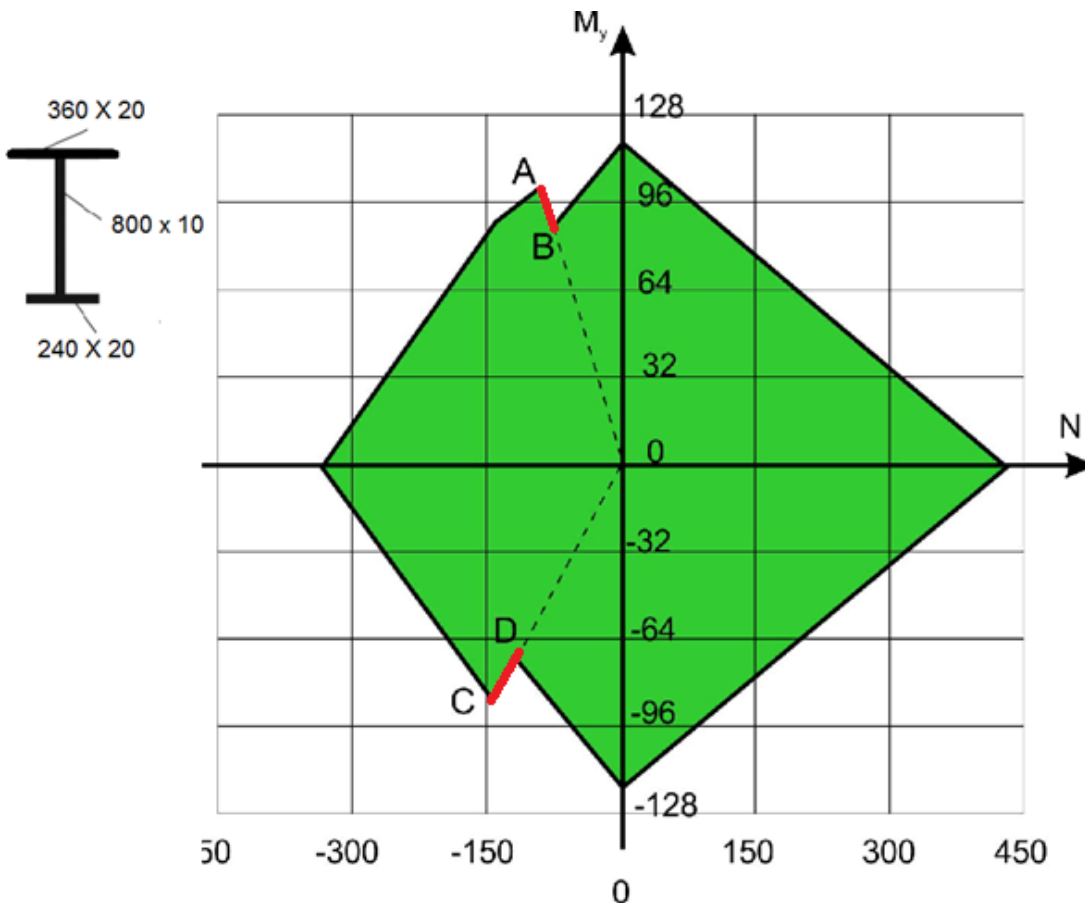
$$c(m_x) = \begin{cases} \beta / (1 + \alpha m_x) \leq 1 & \text{при } m_x \leq 5 \\ c_5 (2 - 0,2m_x) + c_{10} (0,2m_x - 1) & \text{при } 5 < m_x < 10 \\ 1 / (1 + m_x \varphi_y / \varphi_b) & \text{при } m_x \geq 10 \end{cases}$$



Невыпуклость синего участка границы обусловлена формулировкой норм, что устойчивость плоской формы изгиба подлежит проверять только при значениях приведенного эксцентриситета > 20 .

Область несущей способности сечений

как интерактивный инструмент анализа норм проектирования



Область несущей способности сечения согласно EN 1993-1-1

НЕВЫПУКЛОСТЬ области несущей способности сечения связана с требованиями EN 1993-1-1:2005, касающимися классификации сечений.

При напряженном состоянии, соответствующем появлению сжимающих напряжений в одной из полок, сечение перестает классифицироваться как **сечение 2-го класса** (пластические деформации стали) и переходит в **3-й класс сечений** (упругие деформации стали).

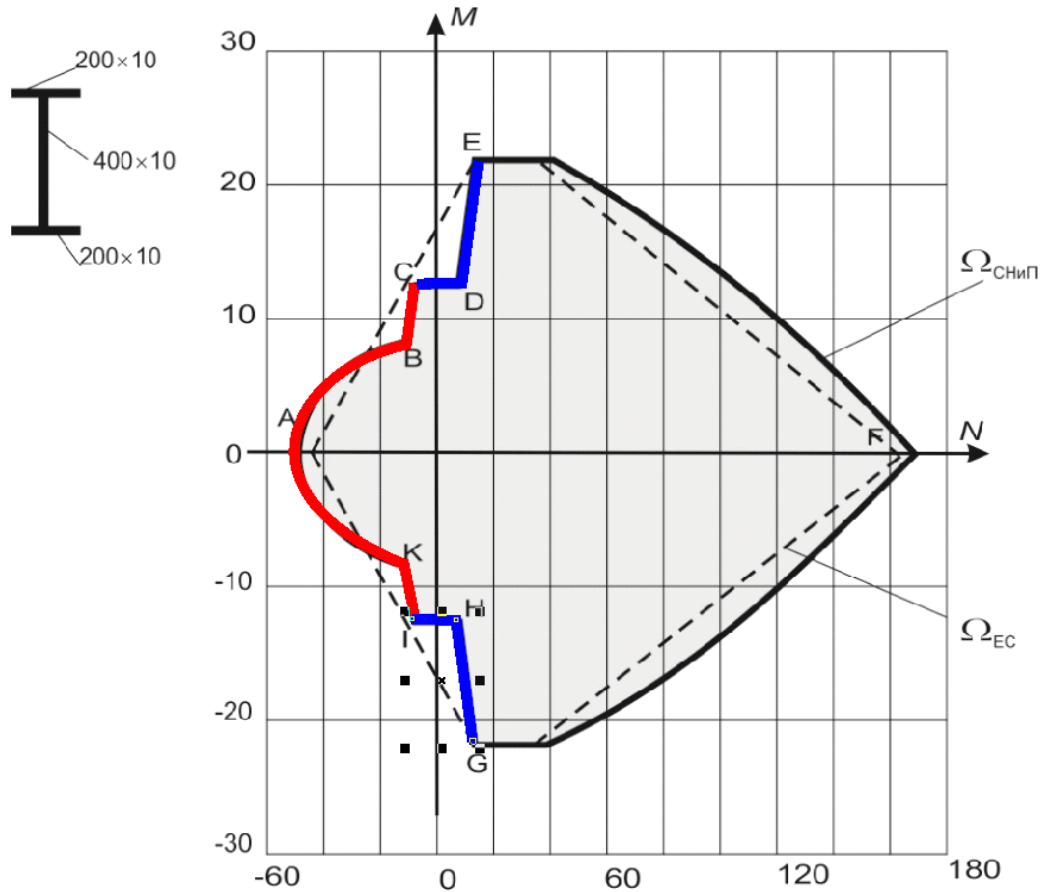
Этому переходу соответствуют скачки АВ и CD.

Область несущей способности сечений

как интерактивный инструмент анализа норм проектирования

Приведенные примеры свидетельствуют о вполне реальной ситуации, когда область несущей способности сечения является невыпуклой.

Происхождение невыпуклости области несущей способности связано с тем, что традиционный подход к нормированию, ориентированный на ручной счет, породил всякого рода «упрощения», при которых некоторые проверки допускалось не выполнять или подменять общий случай некоторым частным случаем.



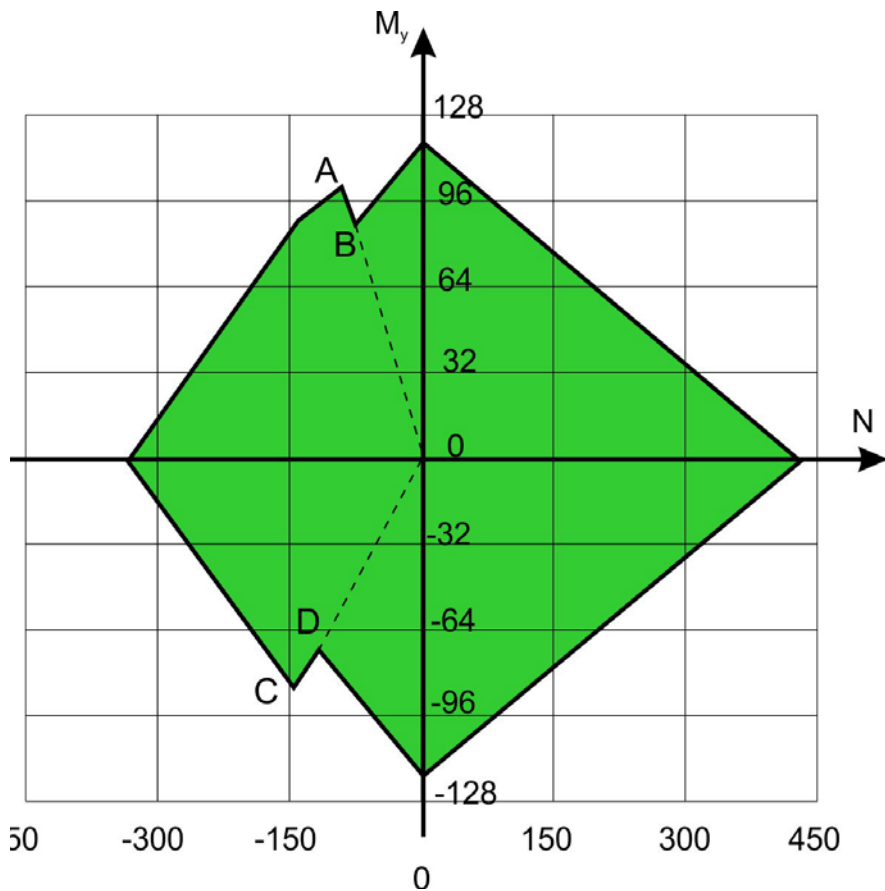
Область несущей способности сечения:

$\Omega_{СНиП}$ - согласно СП 16.13330.2011;

$\Omega_{ЕС}$ - согласно EN 1993-1-1

Область несущей способности сечений

как интерактивный инструмент анализа норм проектирования



Область несущей способности сечения согласно EN 1993-1-1

Неточное сопряжение аппроксимирующих выражений для различных значений аргумента также приводит к невыпуклой области несущей способности.

Кроме того, использование «логических переключателей», которые меняют правила по признаку, не имеющему точной физической подосновы, приводит к скачкообразному изменению алгоритма, как при классификации поперечных сечений в EN 1993-1-1. Современные возможности, представляемые компьютерной проверкой, позволяют выявить такие неточности и определить пути совершенствования норм.

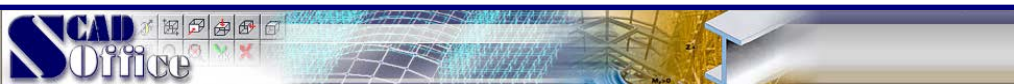
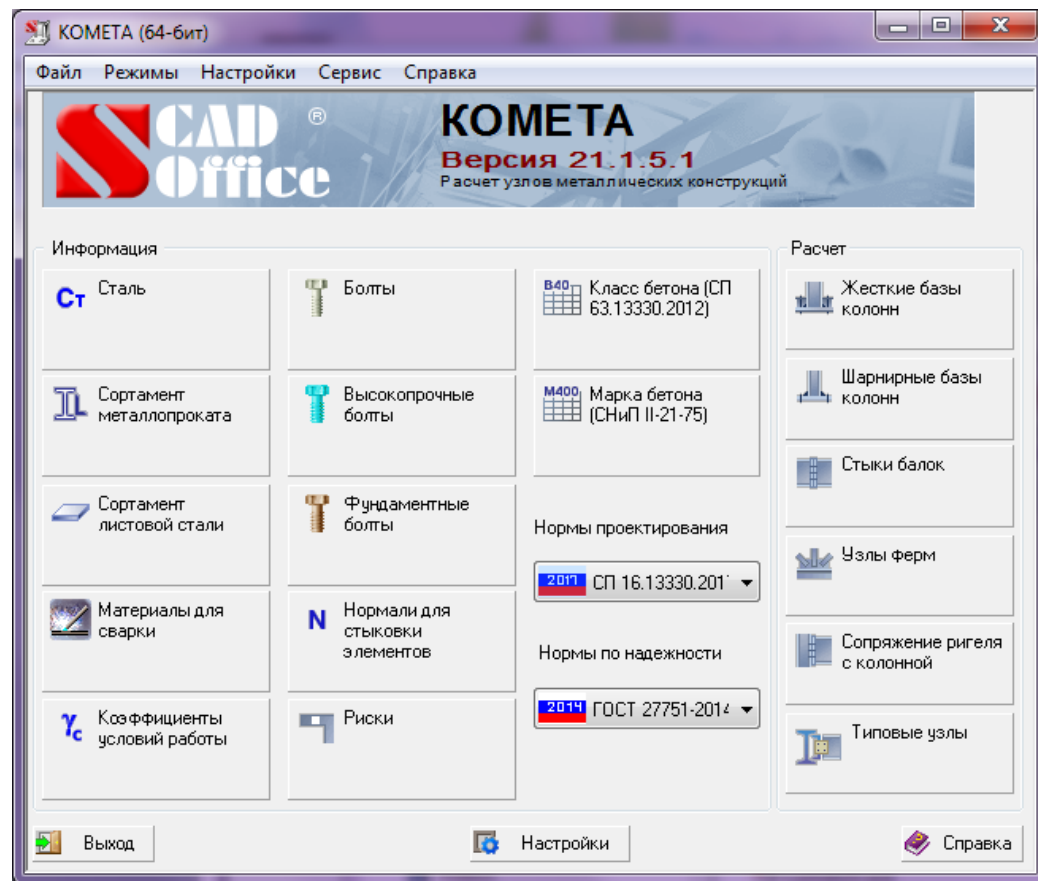
Область несущей способности узлов как интерактивный инструмент анализа традиционных подходов к расчету узлов

Областью несущей способности узла

будем Ω_j называть некоторую область в k -мерном пространстве внутренних усилий, все точки которой соответствуют такому сочетанию этих усилий, под действием которых узел удовлетворяет **всем** **нормативным** **требованиям**.

Границей области несущей способности узла является весь набор ограничений, регламентируемых требованиями норм.

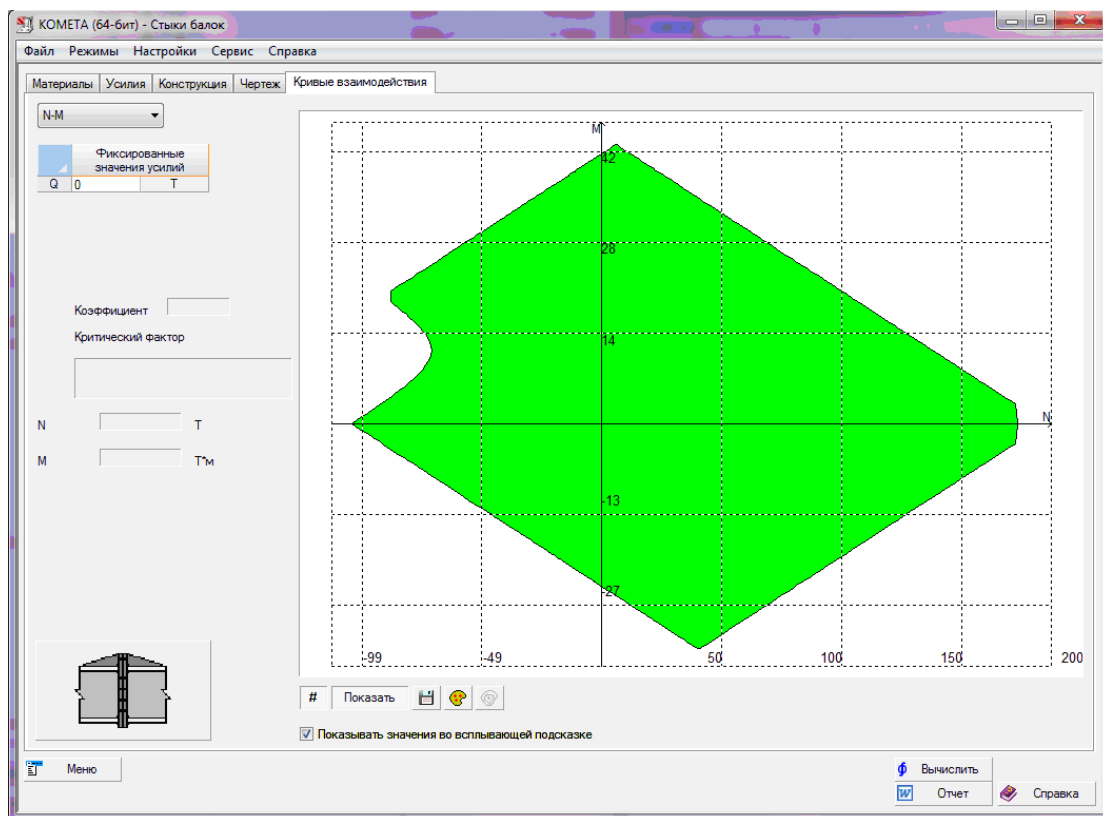
Программа **КОМЕТА** выполняет автоматизированное построение областей несущей способности узлов стальных конструкций для баз колонн, стыков балок, сопряжений ригелей с колоннами, а также узлов ферм.



Область несущей способности узлов

как интерактивный инструмент анализа традиционных подходов к расчету узлов

Форма области несущей способности узлов, а также характер ее границ позволил во многих случаях более детально проанализировать традиционные подходы к расчету узлов стальных конструкций.



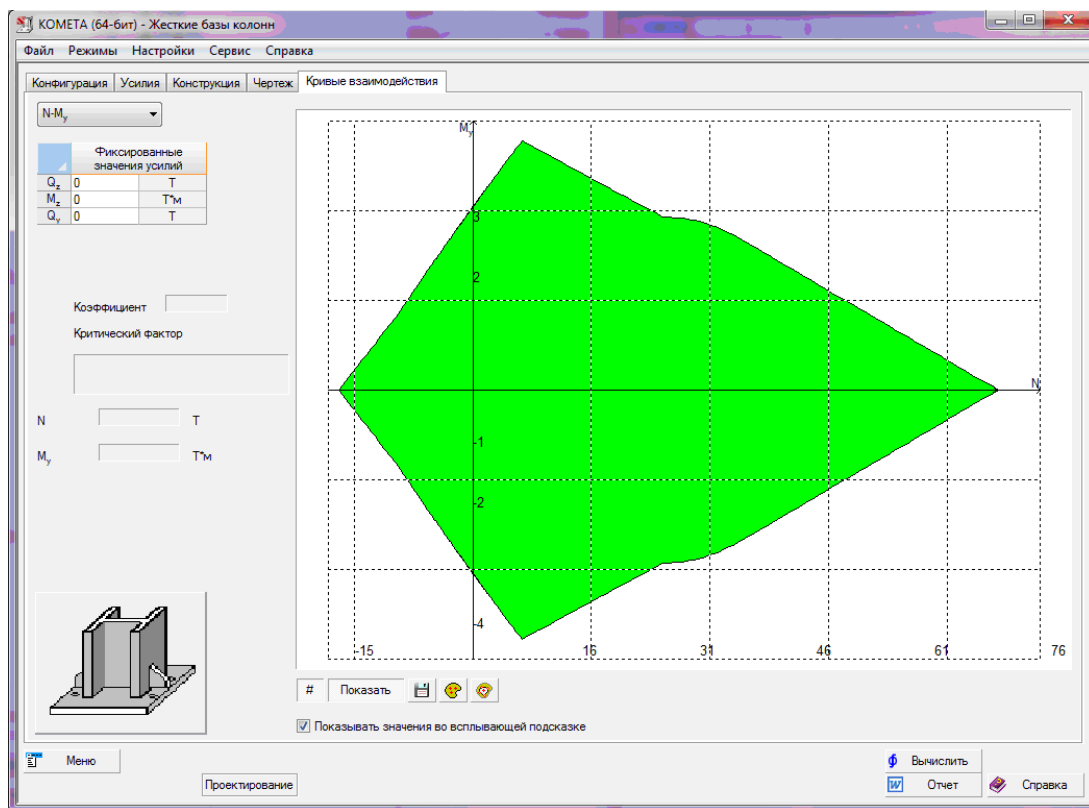
Анализ границ области показал, что упрощения формулировок нормативных положений по типу «допускается не учитывать» или «допускается принимать» в большинстве случаев приводят к различного рода **НЕВЫПУКЛОСТЯМ** на области несущей способности узлов.

Область несущей способности фланцевого стыка балок

Область несущей способности узлов

как интерактивный инструмент анализа традиционных подходов к расчету узлов

Программная реализация расчета несущей способности узлов стальных конструкций потребовала от разработчиков отказаться от каких-либо упрощений нормативных положений.



В некоторых случаях отказ от таких упрощений был неизбежен.

Для жесткой базы колонны при действии изгиба в обеих главных плоскостях инерции возникает проблема определения области контакта опорной плиты с бетоном фундамента. Программа **КОМЕТА** решает эту задачу методом конечных элементов как для эквивалентного железобетонного сечения.

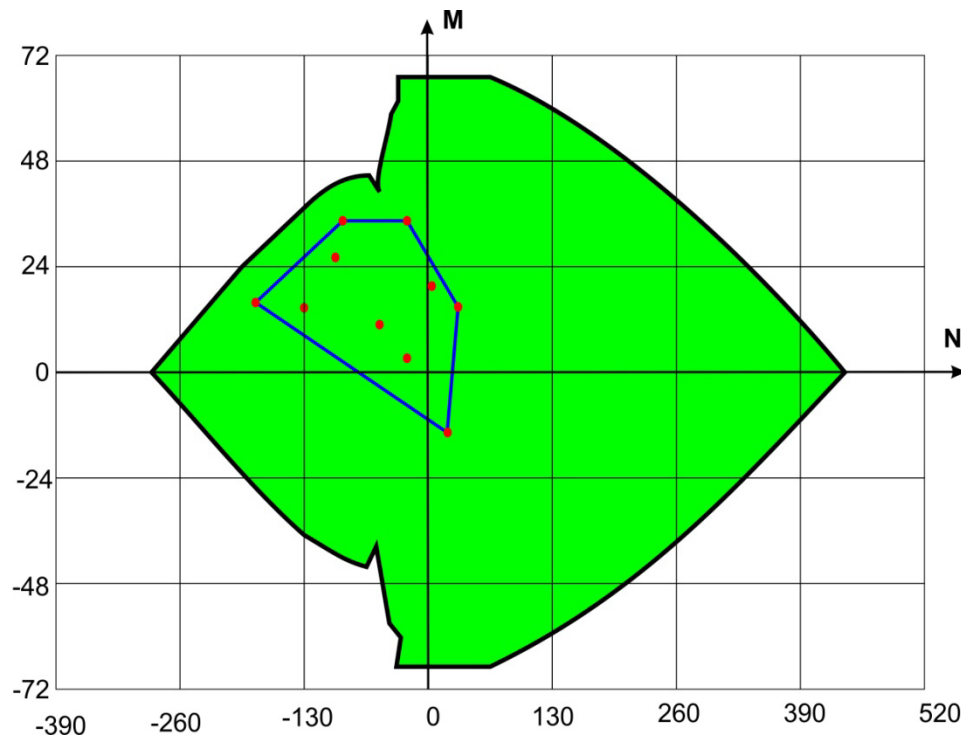
Область несущей способности узла жесткой базы колонны

Область несущей способности

как интерактивный инструмент анализа условий нагружения

Опасности, связанные с невыпуклостью области несущей способности, указывают на возможность анализа близости реальной совокупности нагрузок к тому участку границы области, где проявляется свойство невыпуклости.

Дополнительный инструментарий, представляемый компонентами SCAD Office, позволяет отобразить все множество проверяемых сочетаний внутренних усилий, задаваемых пользователем, в виде набора точек. Демонстрируется также выпуклая оболочка этих точек.



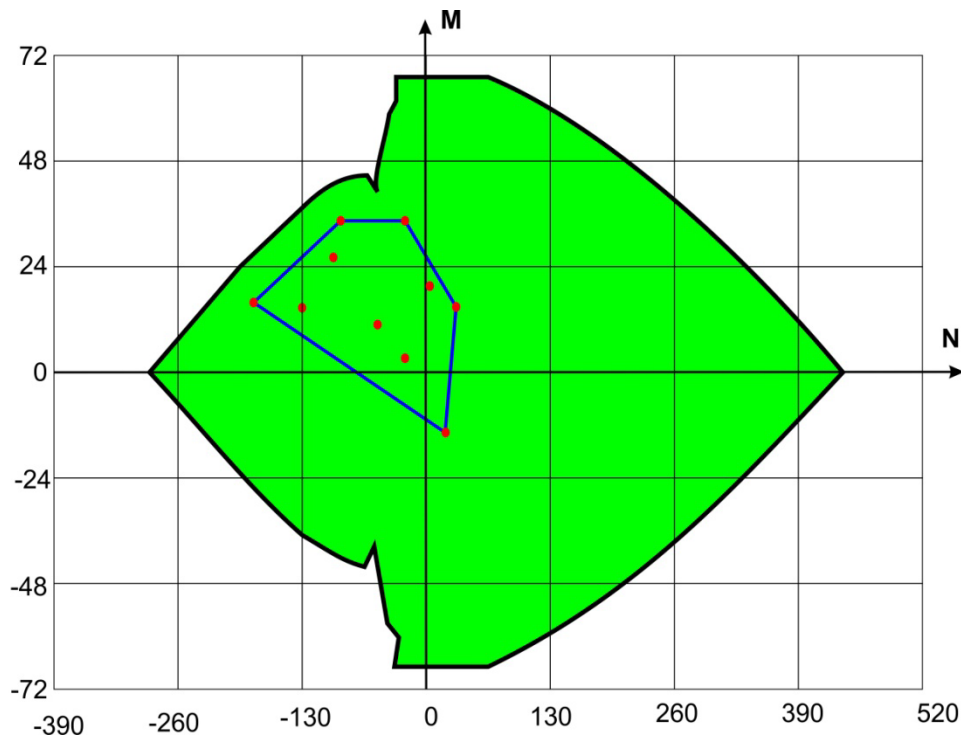
Заданные нагружения и их выпуклая оболочка, совмещенная с областью несущей способности сечения

Область несущей способности

как интерактивный инструмент анализа условий нагружения

Дополнительный инструмент, представляемый компонентами SCAD Office, позволяет отобразить все множество проверяемых сочетаний внутренних усилий, задаваемых пользователем, в виде набора точек. Демонстрируется также выпуклая оболочка этих точек.

Несмотря на то, что эти комбинации не подвергались прямой проверке, в том случае, когда выпуклая оболочка нагружений не выходит из области несущей способности сечения, можно гарантировать, что и разнообразные нагружения, скомбинированные из заданных, не являются опасными.



Заданные нагружения и их выпуклая оболочка, совмещенная с областью несущей способности сечения

Область несущей способности

как интерактивный инструмент анализа в SCAD Office

Выводы

1. Рассмотрено понятие области несущей способности сечений и узлов стальных конструкций в терминах норм проектирования. Отдельное внимание уделено важному свойству выпуклости области несущей способности.
2. Представлен и реализован в пакете программ SCAD Office алгоритм автоматизированного построения областей несущей способности сечений, соединений и узлов стальных конструкций.
3. Построение области несущей способности сечения или узла, совмещенное с выпуклой оболочкой заданных внутренних усилий, является гибким интерактивным инструментом анализа проектных решений и условий их нагружения.
4. Область несущей способности сечений также является способом критического анализа положений тех нормативных документов, которые используются для проверки сечений.
5. Область несущей способности использовалась в процессе разработки программ как инструмент критического анализа традиционных подходов к проектированию и расчету узлов стальных конструкций.

*Международный научно-практический семинар
«Расчет и проектирование конструкций в среде SCAD Office 21»
Москва, 17-18 апреля 2018*

Спасибо за внимание

*Игорь ГАВРИЛЕНКО, Сергей ГИРЕНКО
Эдуард КРИКСУНОВ, Анатолий ПЕРЕЛЬМУТЕР
Михаил ПЕРЕЛЬМУТЕР, Виталина ЮРЧЕНКО*

SCAD Soft, Киев, Украина

