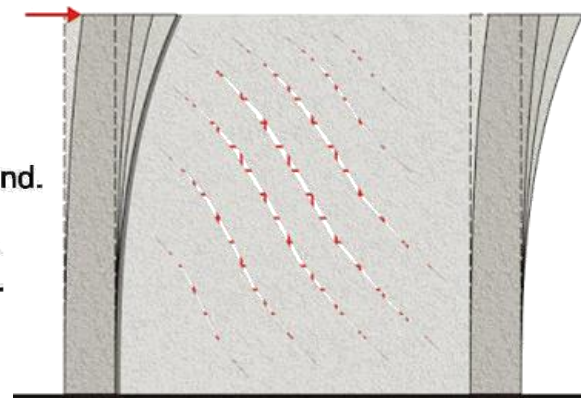
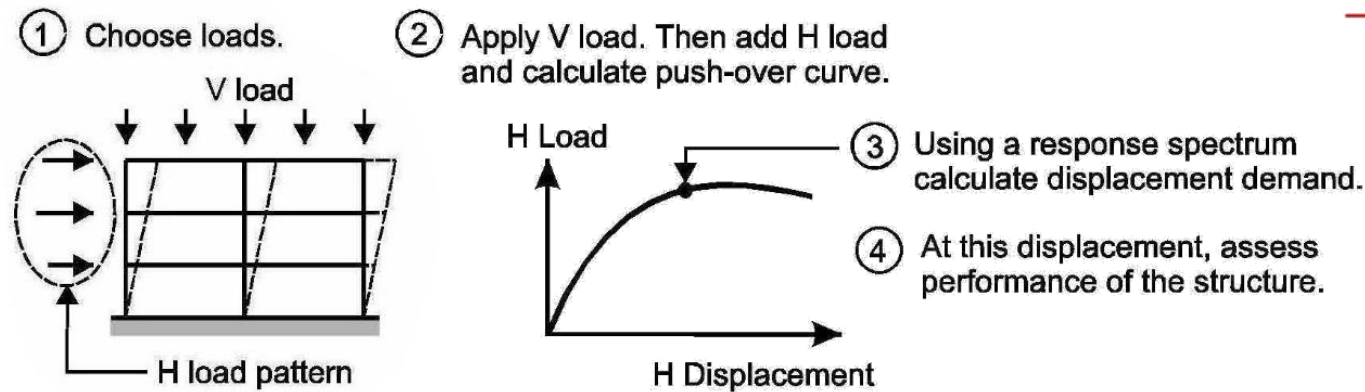




# МКЭ-процессор

Расчетный процессор с каждым годом совершенствуется и развивает свои возможности во всех направлениях. В этом году основной акцент был поставлен на расширение круга задач связанных с динамикой и расчетом зданий и сооружений на сейсмостойкость.



Изучение поведения зданий и сооружений, в которых при сильных землетрясениях развиваются значительные неупругие деформации и динамические характеристики меняются во времени, можно производить посредством нелинейного динамического метода (прямого интегрирования) с применением записей акселерограмм. Указанный метод является наиболее точным для определения требуемых сил и деформаций в разных элементах конструкций, но его применение ограничено из-за особой чувствительности к математическому моделированию. Требуемое время для подготовки модели, ее расчета и правильной интерпретации полученных результатов, делает такой расчет непрактичным.

Для оценки поведения конструкций при сейсмическом воздействии за пределами упругости инженеры в настоящее время предпочитают использовать нелинейный статический метод **PUSHOVER** из-за его простоты. Указанный метод пользуется большой популярностью, на что указывает большое количество публикаций и соответствующих нормативов.

**Pushover** - это статический нелинейный расчет, при котором вертикально нагруженная расчетная модель сооружения подвергается монотонному наращиванию горизонтальной сейсмической нагрузки с контролем горизонтального перемещения.

Наращивание горизонтальной нагрузки производится до тех пор, пока не будет достигнуто контрольное перемещение заранее назначенных уровней конструкции, либо ее полное разрушение. В отечественных научных и инженерных кругах Pushover известен как «метод спектра несущей способности».

Реализованный в ПК ЛИРА-САПР метод расчета основывается на том, что выполняется расчет нелинейной многомассовой модели, а график спектра несущей способности строится по обобщенным результатам. На основании обобщенных перемещений и обобщенных ускорений.

ПК ЛИРА-САПР 2017 R1 x64 - Линейная схема

Создание и редактирование    Расширенное редактирование    Расчет    Анализ    Расширенный анализ    Железобетон    Сталь    Кирпич    Сталь    Окно    ?

НДС схемы    Расчет    Мозаика/изополю    Расчет    Расчет    Расчет    Мозаика/векторы    Мозаика/изополю    Расчет трещин    Глубина    Ширина    Найти центр    Инструменты

Деформации    ЛИТЕРА (вычисление напряжений)    Устойчивость    Сочетания    Рассчитать нагрузку    Мозаика/векторы    Результат    Инерция    Коэффициенты постели    Разрушение

Линейная схема:1

СЕЙСМИКА по X  
Составляющая 2  
Массы собраны из загружений: 1

Линейная схема:2

СЕЙСМИКА по X  
Составляющая 2  
Массы собраны из загружений: 1

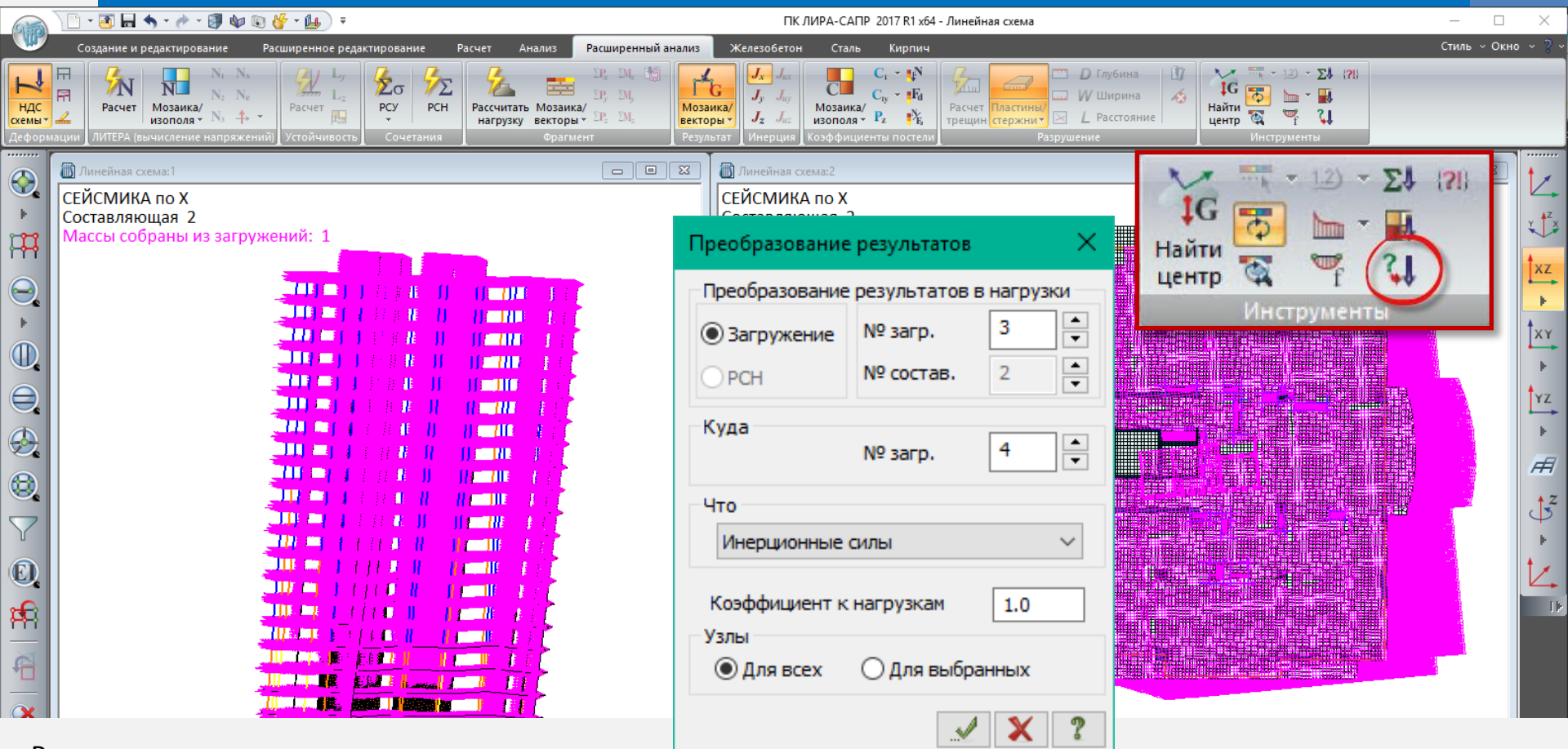
Линейная схема: Периоды колебаний (01)

З...	Н п/п	Собств. з...	Рад/с.	Гц.	Периоды	Коеф. ра...	Масса	Сумма м.
3 - (мод. 57)								
3	1	0.364981	2.739872	0.436285	2.292078	0.299134	1.681613	1.681613
3	2	0.324162	3.084881	0.491223	2.035735	1.619855	58.333421	60.015034
3	3	0.297355	3.362986	0.535507	1.867388	-0.889248	10.410027	70.425061
3	4	0.127611	7.836346	1.247826	0.801394	0.195162	0.499345	70.924407
3	5	0.098530	10.149145	1.616106	0.618771	0.659268	11.580772	82.505179
3	6	0.086672	11.537787	1.837227	0.544298	-0.514033	3.941279	86.446458
3	7	0.069810	14.324555	2.280980	0.438408	0.118408	0.174576	86.621033

Сейсмические нагрузки

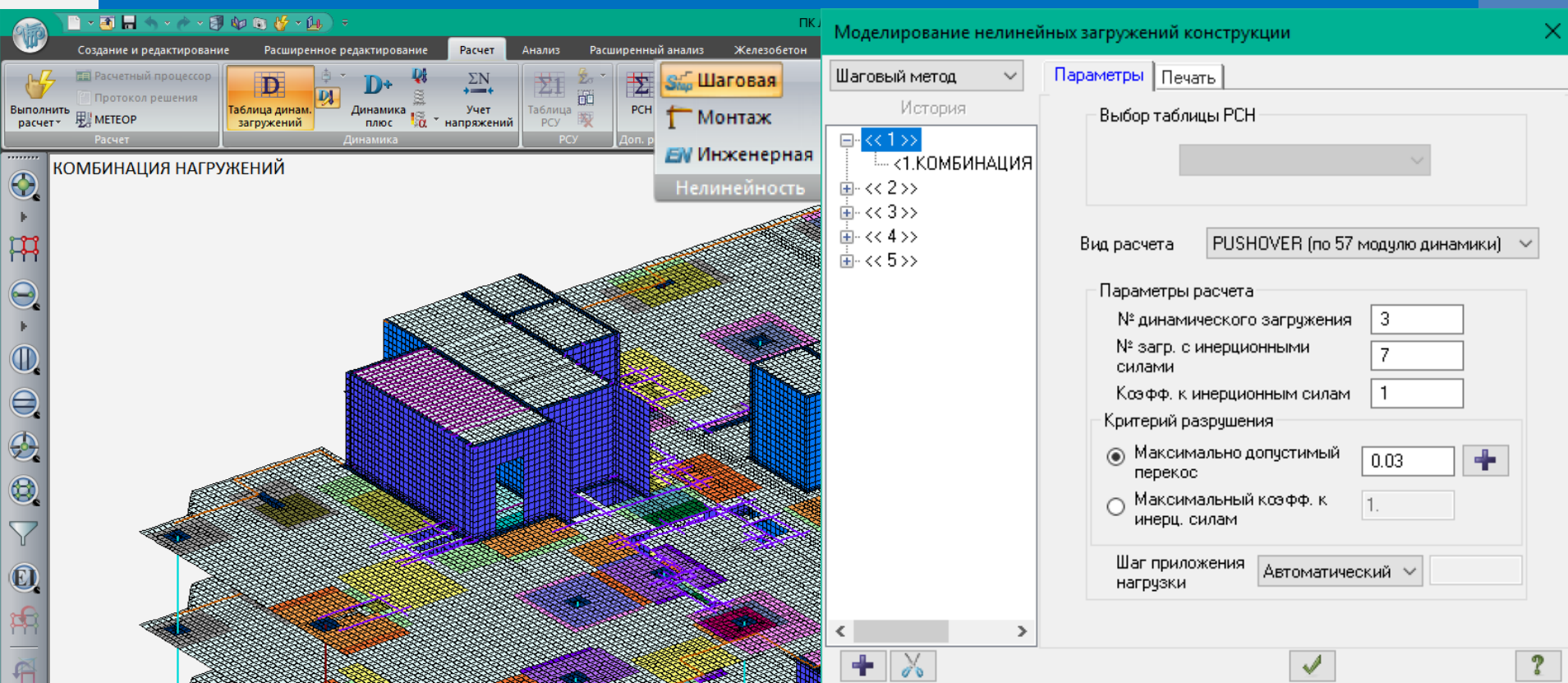
3. СЕЙСМИКА по X    2    Средн    1.    уз.: 0 / 798173    Эл.: 0 / 1451504    Загр.: 3 / 3





Расчет состоит из следующих этапов:

1. Пользователем формируется многомассовая расчетная модель сооружения и выполняется ее расчет на заданное сейсмическое воздействие в линейной постановке, в результате которого определяются: величины сосредоточенных масс в каждом уровне по высоте; частоты и периоды собственных колебаний; ординаты форм собственных колебаний; величины инерционных сил в каждом уровне по высоте; а также выполнен расчет конструирования, подобраны площади арматуры для железобетонных конструкций.
2. Т.к. реакция конструкций или кривая «способности» зависит от выбранной схемы распределения горизонтальных сил. Из всех вычисленных форм собственных колебаний выбирается форма, имеющая наибольший модальный вклад. Инерционные силы от выбранной составляющей передаются в отдельное загрузку.

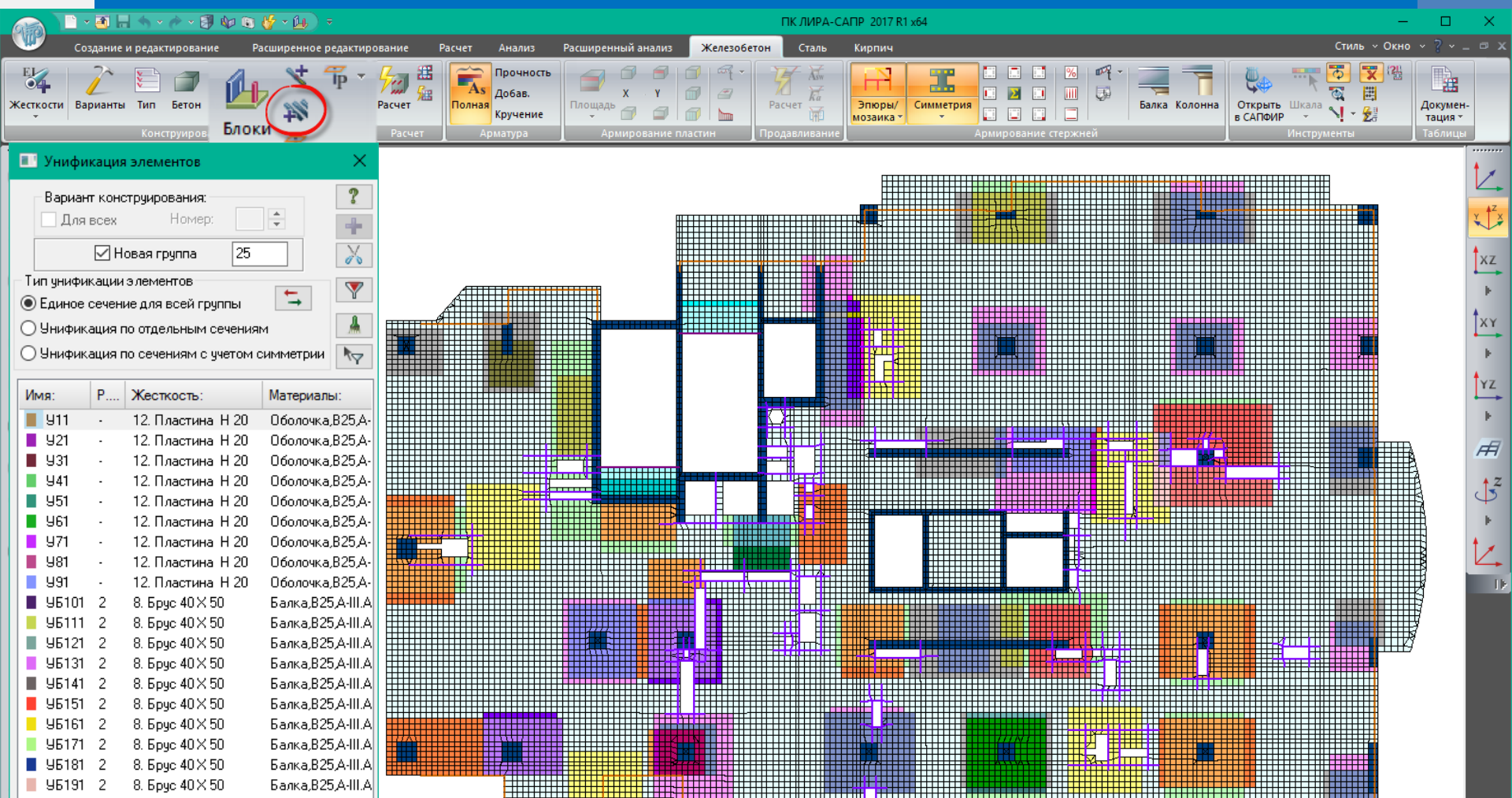


Далее линейная расчетная модель преобразуется в физически нелинейную, где формируется история ее нагружения, в которую последовательно входят: полная вертикальная нагрузка; пошагово прилагаемые горизонтальные сейсмические силы, соответствующие форме собственных колебаний с наибольшей модальной массой.

Количество историй нагружений не ограничено. В рамках одной расчетной модели можно рассматривать различные варианты приложения сейсмической нагрузки.

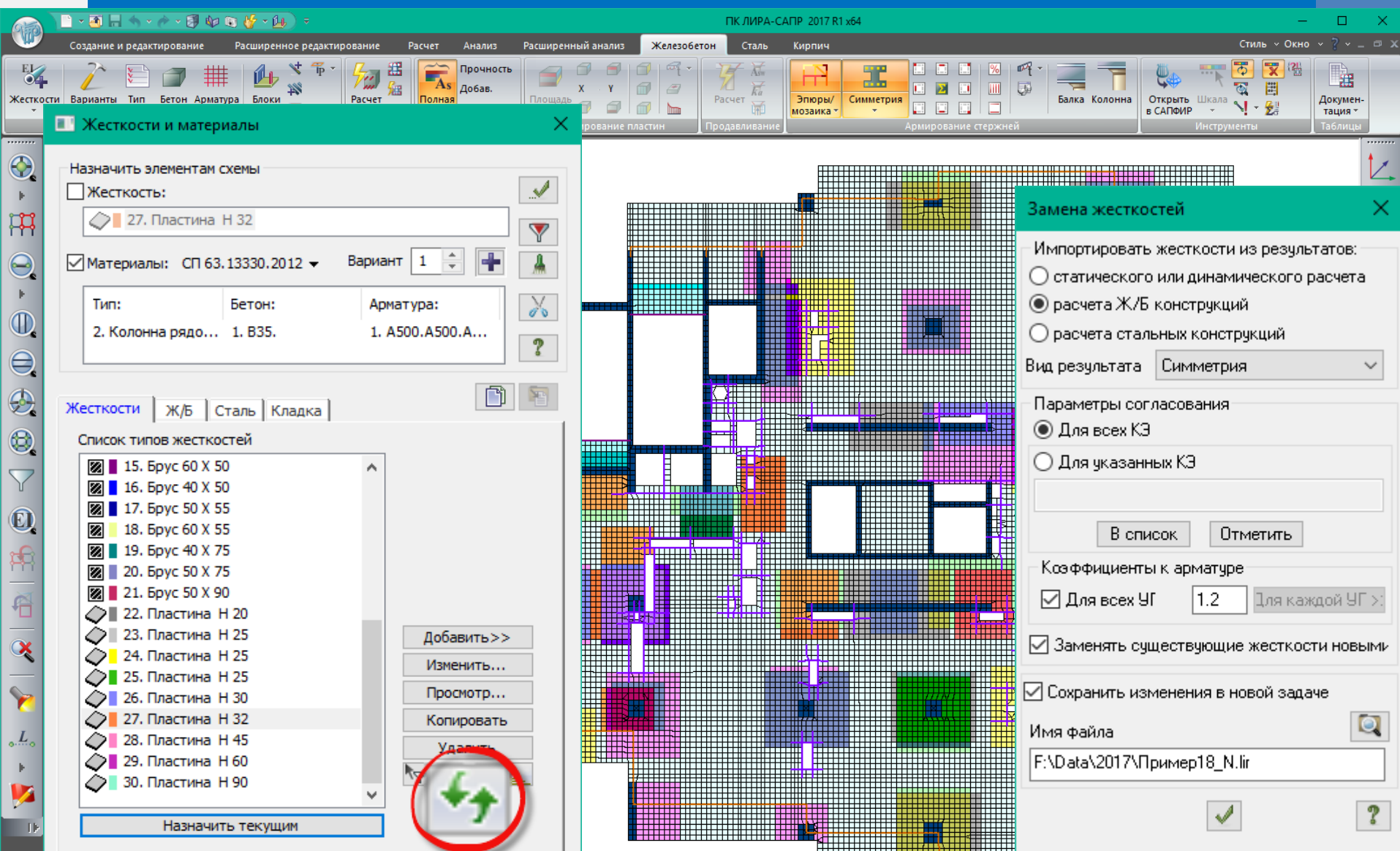
Реализовано два механизма наращивания сейсмической нагрузки, которые служат критерием оценки состояния схемы:

- первый вариант, на основании заданных предельных перекосов этажей, при достижении которых наращивание инерционных сил прекращается;
- второй вариант, непосредственно задание пользователем коэффициента к инерционным силам.

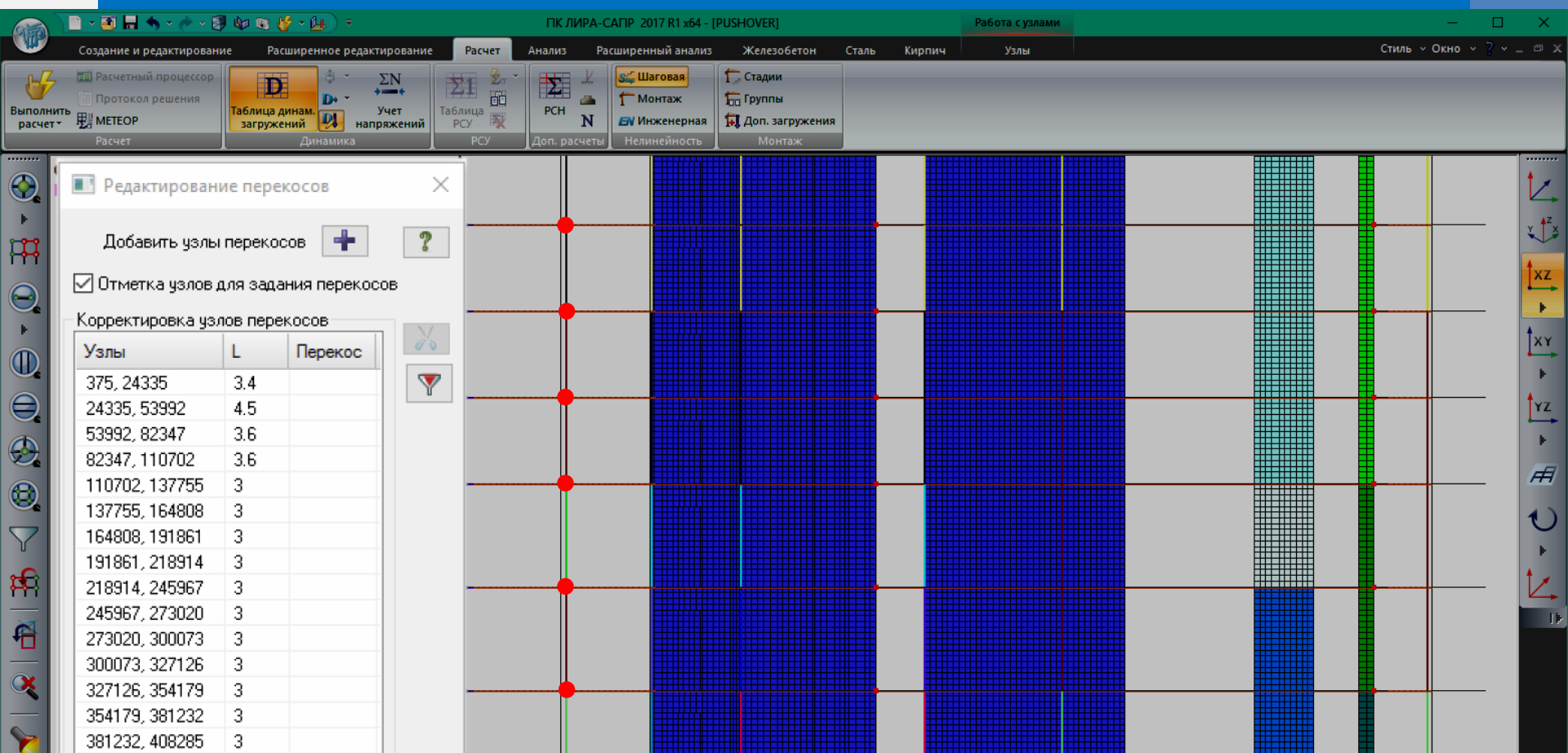


Напомню, что в ПК ЛИРА-САПР уже давно существует механизм автоматического создания физически нелинейной модели с готовым набором нелинейных жесткостей. Законы деформирования основного и армирующего материала, а также подобранная арматура передаются из линейной схемы, для которой выполнен подбор требуемого армирования. При формировании файла эти жесткости назначаются элементам схемы автоматически. Для того, чтобы воспользоваться данной функцией необходимо при расчете конструирования железобетона использовать унификацию элементов.





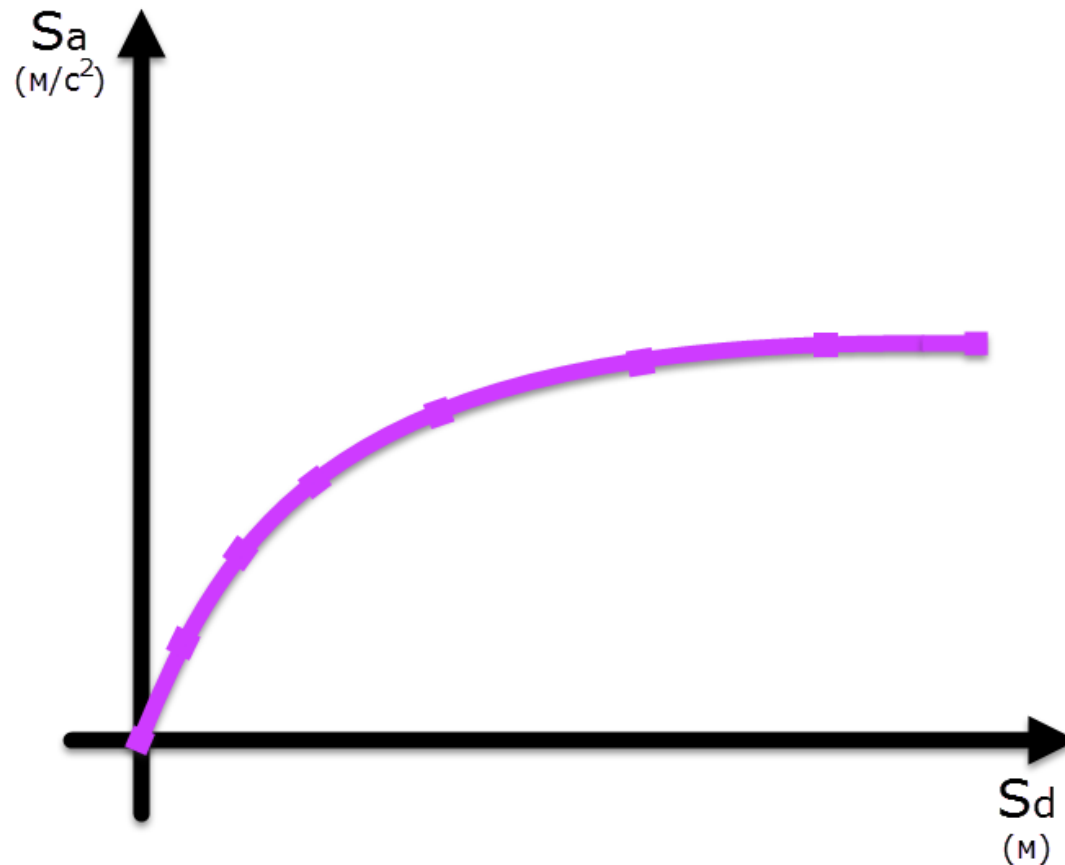
Доступ к настройкам осуществляется в режиме конструирования железобетона. В меню «Жесткости и материалы» есть кнопка «Замена жесткостей». Кроме того, за счет коэффициентов, подобранную площадь армирования можно максимально приблизить к реальной, таким образом учесть конструктивное армирования.



В качестве критерия для оценки состояния схемы (разрушения)/остановки расчета служат предельные перекосы этажей, заданные пользователем или же максимальный коэффициент к инерционным силам, при достижении которого расчет прерывается.

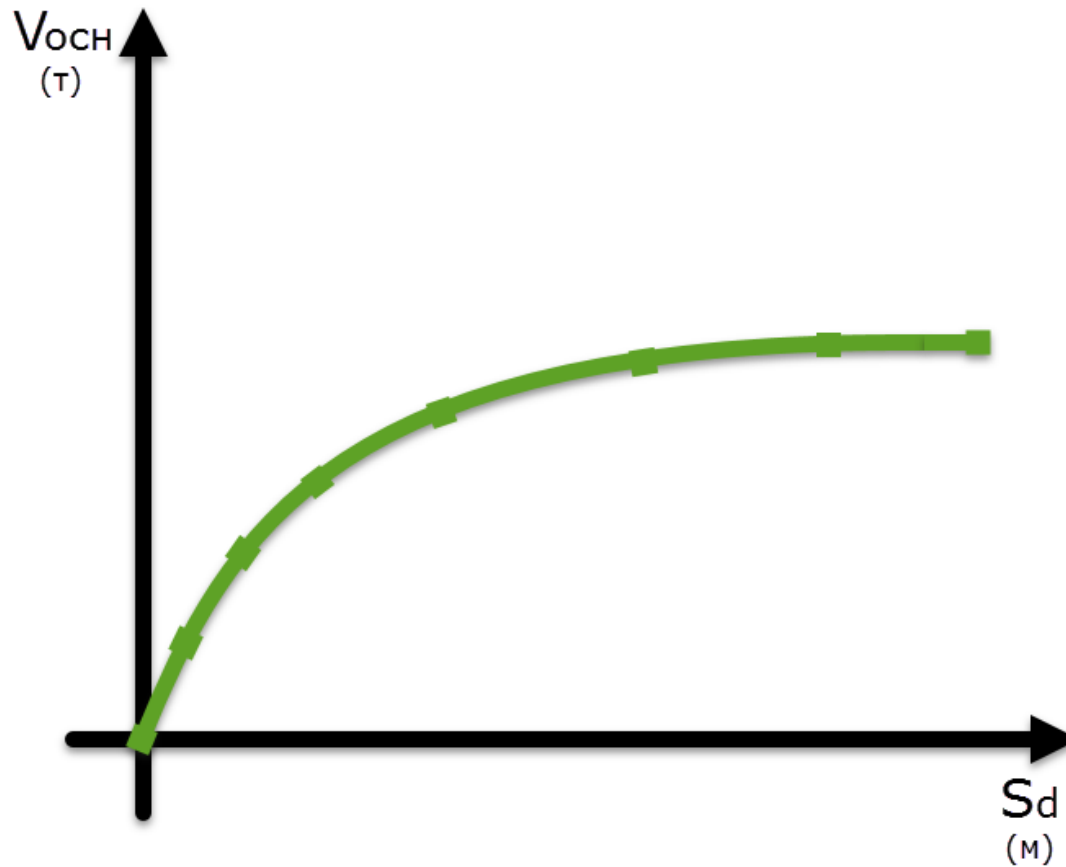
Для контроля предельных перекосов этажей создан специальный инструмент. Задание пар узлов, которые будут определять высоту этажа можно выполнить непосредственно одиночным указыванием, или же воспользоваться специальным фильтром, который позволяет выделить группы узлов на уровне пересечения с горизонтальными элементами схемы, балками и плитами. Таким образом можно за один раз добавить список для плети колонн по всем этажам здания. Автоматический поиск узлов выполняется не только для пересечения колонн, но и для стен.





Результаты нелинейного расчета на каждом шаге наращивания инерционной нагрузки многомассовой расчетной модели подвергаются преобразованиям, позволяющим для этой модели получить два обобщенных графика:

Первый – **спектр ускорения** – график в координатах «ускорение  $S_a$  – перемещение  $S_d$ »



Второй – **спектр несущей способности** – график в координатах «горизонтальная сила  $V$  – перемещение  $S_d$ ». Данный график получается автоматически, путем умножения полученных ускорений на модальную массу.

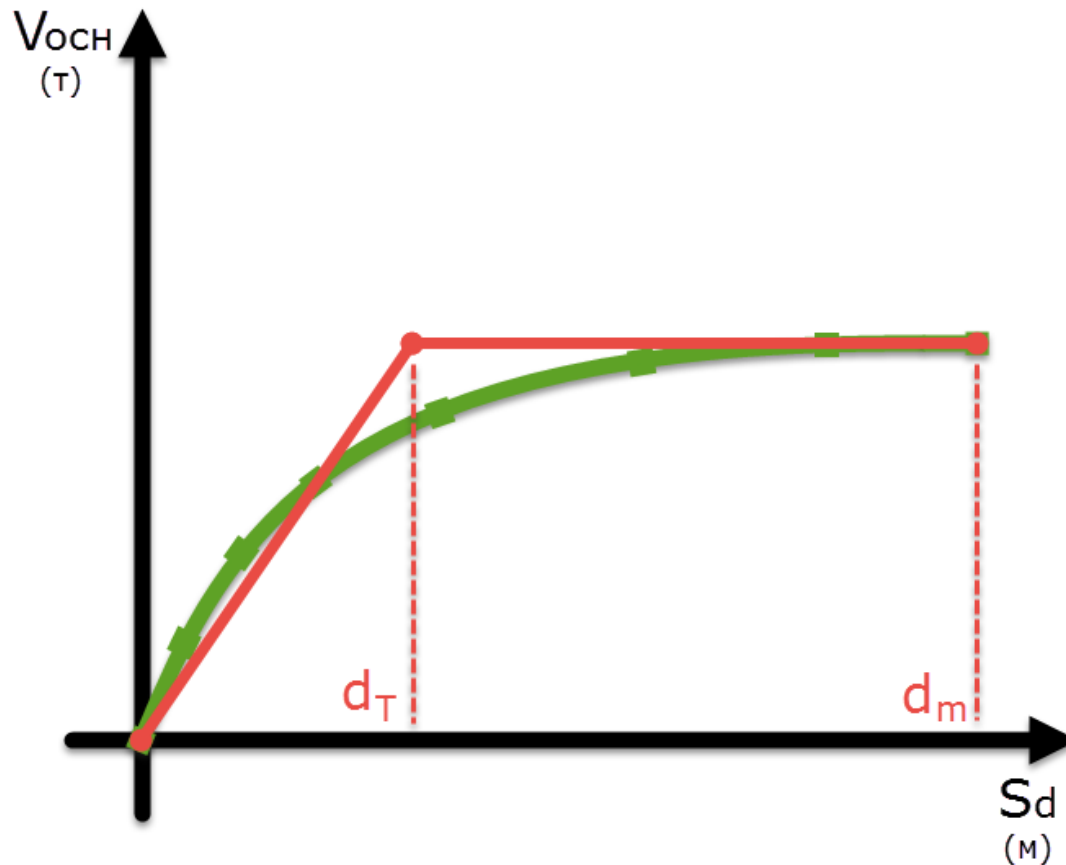
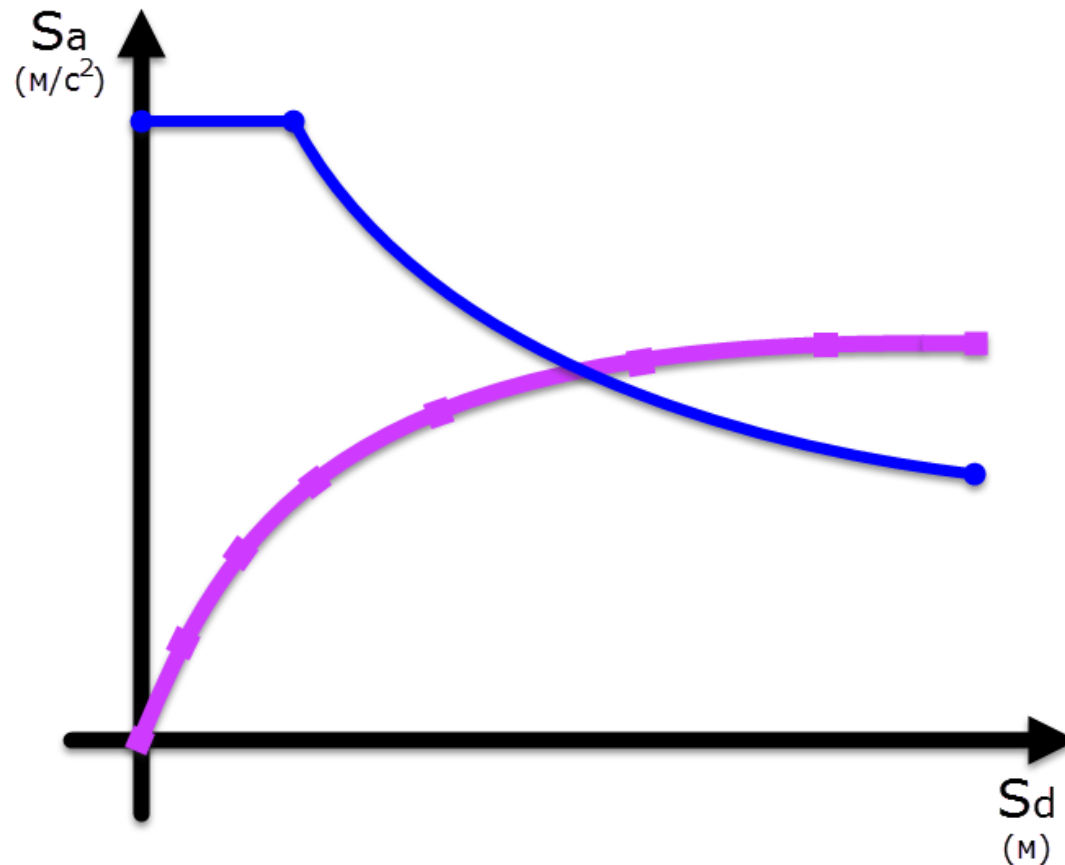


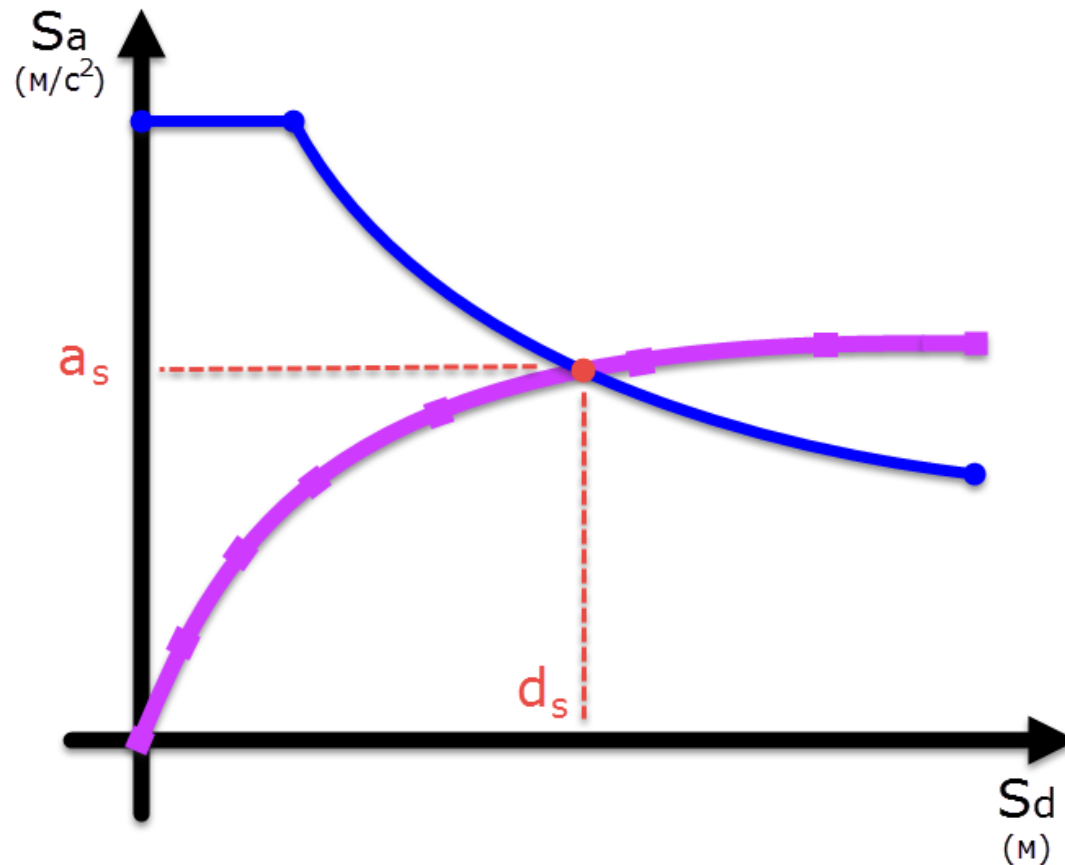
График «горизонтальная сила  $V$  – перемещение  $S_d$ » преобразуется к билинейному виду на основании равенства площадей (энергий  $E$ ) нелинейного и билинейного графиков. При этом на билинейном графике появляется промежуточная точка – перемещение податливости  $dt$ , которое определяется по следующей формуле:  $dt = 2 \cdot (dm - E/Vm)$ .

Далее определяется коэффициент податливости системы соотношением перемещения на последнем шаге и перемещением податливости, по формуле:  $\mu = dm / dt$ .





Для полученного коэффициента податливости  $\mu$  ( $\mu = 1; 2; 4; 6$ ) выбирается график нормативной зависимости «ускорение  $S_a$  – перемещение  $S_d$ », его еще называют графиком сейсмического «требования». Для промежуточных значений  $\mu$  график строится по интерполяции. После кривая «способности» - график  $S_a(S_d)$ , полученный в результате нелинейного расчета и сейсмическое «требование» вычерчивается в одной и той же координатной системе.



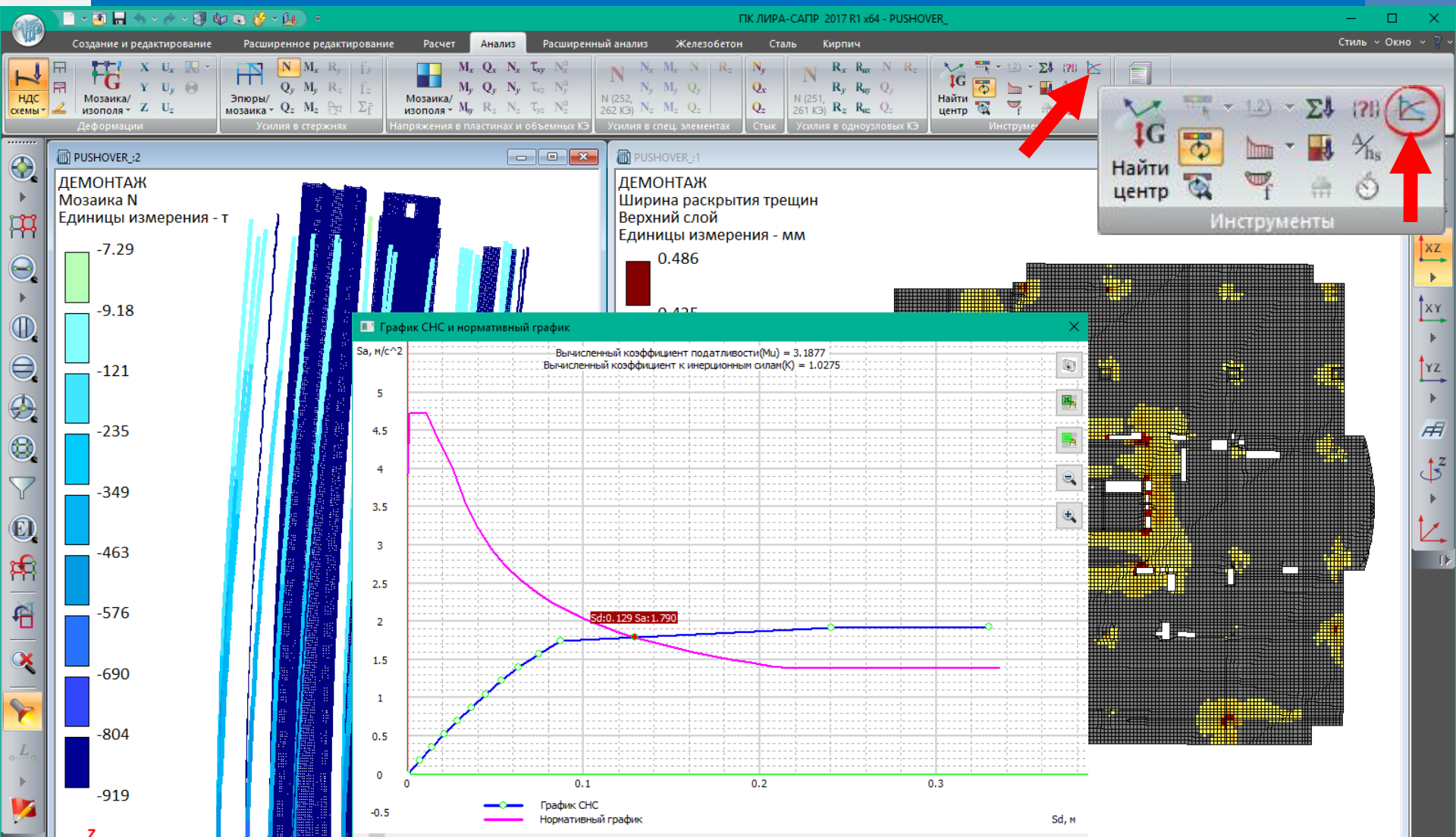
Точка пересечения нормативного и нелинейного графиков называется точкой состояния:

$d_s$  - искомое обобщенное нелинейное перемещение, при котором определяется НДС всей конструкции;

$a_s$  – соответствующее ускорение, при котором определяется НДС всей конструкции.

Перемещение  $d_s$  - это и есть искомое обобщенное нелинейное перемещение, при котором определяется НДС всей конструкции. Горизонтальная сила состояния  $V_s = a_s * M$ .

На основании величины  $d_s$  процессор корректирует шаг нелинейного расчета в области пересечения с графиком сейсмического требования и получает необходимое НДС всей схемы.



В результатах расчета **PUSHOVER**, как и для любой физически нелинейной схемы, можно просмотреть результирующие перемещения по истории нагружения, проанализировать усилия в элементах схемы, оценить состояние материалов, т.е. получить информацию о разрушенных элементах. А также построить график «Спектр несущей способности».





ЛИРА-САПР - E:\Результаты 2017\PUSHOVER\_01.PUSHOVER

Файл Редактировать Опции Окно ?



13:31 Контроль решения

Максимальный перекося 0.0146422 достигнут в паре узлов (№4 №7)

13:31 Суммирование результатов

Величина выполненного шага = 0.0497021; Величина всех выполненных шагов = 0.997163

НЕЛИНЕЙНОЕ ЗАГРУЖЕНИЕ 1. Pushover. шаг 7

13:31 Пересчет жесткостных характеристик элементов

13:31 Формирование матрицы жесткости

13:31 Разложение матрицы жесткости

13:31 Вычисление неизвестных

13:31 Контроль решения

Максимальный перекося 0.03 достигнут в паре узлов (№5 №8)

13:31 Суммирование результатов

Величина выполненного шага = 0.0311458; Величина всех выполненных шагов = 1.02831

НЕЛИНЕЙНОЕ ЗАГРУЖЕНИЕ 1. Pushover. Вычисленный коэффициент податливости  $M_u = 3.81436$

НЕЛИНЕЙНОЕ ЗАГРУЖЕНИЕ 1. Pushover. Вычисленный коэффициент к инерционным силам = 0.928683

НЕЛИНЕЙНОЕ ЗАГРУЖЕНИЕ 1. Pushover. Вычисление окончательного результата

13:31 Пересчет жесткостных характеристик элементов

13:31 Контроль решения

13:31 Пересчет жесткостных характеристик элементов

13:31 Формирование матрицы жесткости

13:31 Разложение матрицы жесткости

Также для анализа будет полезны просмотреть протокол выполнения решения задачи.

На данном слайде представлен фрагмент протокола расчета, в котором видно для какой пары узлов достигнут предельный перекося, коэффициент податливости схемы, какой коэффициент к инерционным силам получен.