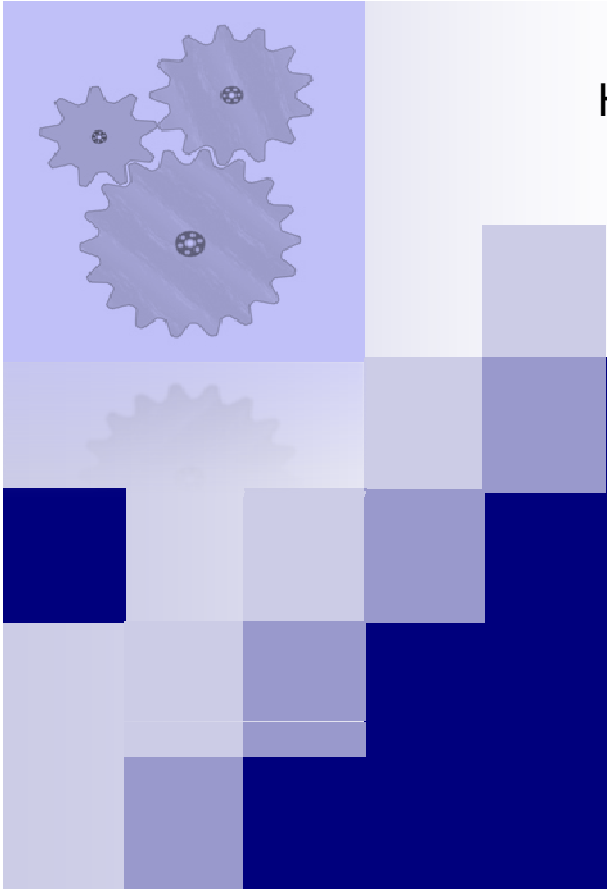




НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
СТРОИТЕЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Спецкурс по поверочным работам

Особенности расчета зданий на прогрессирующее разрушение

Москва 2023, Сизов Д.К.



Постановка проблемы

1. Нормативные документы, регламентирующие проведение расчета на прогрессирующее разрушение
2. Основные методы расчета на прогрессирующее разрушение
3. Квазистатический и динамический методы расчета на прогрессирующее обрушение
4. Особенности приложения нагрузок при проведении расчетов на прогрессирующее обрушение
5. Характеристики материалов, коэффициент надежности по ответственности, коэффициенты условий работы при расчете на прогрессирующее обрушение
6. Проверки при расчете на прогрессирующее обрушение
7. Примеры применения квазистатического и динамического расчета на прогрессирующее обрушение.



Основные нормативные документы, регламентирующие проведение расчетов на прогрессирующее обрушение

1. Федеральный закон от 30.12.2009 № 384-ФЗ «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений»
2. ГОСТ 27751-2014 «Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения»
3. СП 56.13330.2011 «Производственные здания»
4. СП 118.13330.2012 «Общественные здания и сооружения»
5. СП 267.1325800.2016 «Здания и комплексы высотные. Правила проектирования»
6. СП 63.13330.2012 «Бетонные и железобетонные конструкции»
7. СП 14.13330.2018 «Строительство в сейсмических районах»
8. СП 296.1325800.2017 «Здания и сооружения. Особые воздействия»
9. СП 385.1325800.2018 «Защита зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения. Правила проектирования. Основные положения»
10. Методическое пособие. Проектирование мероприятий по защите зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения



Основные понятия и определения

Определение: прогрессирующее (лавинообразное) обрушение: **Последовательное (цепное) разрушение несущих строительных конструкций, приводящее к обрушению всего сооружения или его частей вследствие начального локального повреждения**

Технический регламент 384-ФЗ, ст. 16, ч.6:

При проектировании здания или сооружения повышенного уровня ответственности должна быть также учтена аварийная расчетная ситуация, имеющая малую вероятность возникновения и небольшую продолжительность, но являющаяся важной с точки зрения последствий достижения предельных состояний, которые могут возникнуть при этой ситуации (в том числе предельных состояний при ситуации, возникающей в связи со взрывом, столкновением, с аварией, пожаром, а также непосредственно после отказа **одной** из несущих строительных конструкций).

Ст.2, ч.2, п.1

Авария- опасное техногенное происшествие, создающее на объекте, определенной территории или акватории угрозу жизни и здоровью людей и приводящее к разрушению и повреждению зданий, сооружений, оборудования и транспортных средств, нарушению производственного или транспортного процесса, нанесению ущерба окружающей среде

Ст. 2, ч.2, п. 25

Техногенные воздействия- опасные воздействия, являющиеся следствием аварий в зданиях, сооружениях или на транспорте, пожаров, взрывов, или высвобождения различных видов энергии также воздействия, являющиеся следствием строительной деятельности на прилегающих территориях.



Необходимость расчета прогрессирующее обрушение

Федеральный закон о защите населения от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера.

Ст.1

Быстроразвивающиеся опасные природные явления и техногенные процессы-это негативные явления и процессы, определенные в ходе прогнозирования угрозы возникновения чрезвычайных ситуаций, локализация и ликвидация которой требует заблаговременной подготовки сил и средств единой государственной системы предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций.

Технический регламент 384-ФЗ.

Ст.6 предусматривает моделирование сценариев возникновения опасных природных процессов и явлений и (или) техногенных воздействий, в том числе при неблагоприятном сочетании опасных природных процессов и явлений и (или) техногенных воздействий.

ГОСТ 27751-2014 примечание к п. 6.6.1

Особые воздействия подразделяются на нормируемые особые воздействия (например, сейсмические, в результате пожара) и аварийные воздействия (например, при взрыве, столкновении с транспортными средствами, при аварии оборудования и отказе работы несущего элемента конструкции), которые не заданы в нормативных документах.



Необходимость расчета на прогрессирующее обрушение

СП 443.1325800.2019 п. 16

Удовлетворение критериям живучести предполагает сохранение (полностью или частично) функциональных свойств конструкции после повреждения—разрушения или отказа в работе отдельных конструктивных элементов. Такие повреждения в основном возникают в результате аварий. При этом необходимо исходить из следующих положений:

А) авария непредсказуема, так как заранее невозможно предсказать место и характер (сценарий) аварии;

Б) авария неизбежна, так как исключить возможность аварии полностью невозможно;

В) необходимо исходить из принципа «единичного» отказа, так как практически любое обрушение начинается с разрушения одного (первого) элемента, далее оно либо затухает в случае обеспечения живучести конструкции, либо развивается лавинообразно до полного разрушения (живучесть не обеспечена).



Необходимость расчета на прогрессирующее обрушение

СП 296.1325800.2017, п. 4.1, 4.2, 4.5

К аварийным относятся особые нагрузки и воздействия, не регламентируемые в нормативных документах, к которым относятся:

- Дефекты материалов;
- Некачественное производство работ;
- Ошибки проектирования, в том числе вызванные несовершенством нормативных документов на проектирование;
- Нарушений эксплуатации зданий, в том числе их промышленного или инженерного оборудования;
- Нарушений технологического процесса, временной неисправности или поломки оборудования и по другим, неустановленным причинам.
- Действие аварийных особых воздействий учитывается расчетом сооружений на прогрессирующее обрушение. Действие аварийных особых нагрузок допускается не учитывать, если выполнены проектные, конструктивные и организационные мероприятия, приведенные в 5.11



Необходимость расчета на прогрессирующее обрушение (продолжение)

СП 296.1325800.2017 п.5.11 и 5.12

Действие аварийных особых нагрузок допускается неучитывать в том случае, если выполнены все следующие требования:

1. Проведен расчет сооружения на действие проектных (нормируемых) особых воздействий, указанных в настоящем своде правил, задании на проектирование и действующих нормативных документах;
2. Введены дополнительные коэффициенты условий работы, понижающие расчетные сопротивления этих элементов и узлов их крепления (для большепролетных сооружений указанные дополнительные коэффициенты условий работы приведены в приложении В)ж
3. Произведены организационные мероприятия, в том числе в соответствии с СП 132.13330, а также другие мероприятия, согласованные с заказчиком (см. Приложение Г)

Окончательные конструктивные решения и необходимые организационные мероприятия должны быть согласованы с заказчиком.



Необходимость расчета на прогрессирующее обрушение (продолжение)

СП 56.13330.2011 «Производственные здания»

П. 5.1 с изм. №1

При проектировании следует рассчитывать на прогрессирующее обрушение производственные здания повышенного уровня ответственности по ГОСТ 27751, а также нормального уровня ответственности с массовым пребыванием граждан и в случаях, предусмотренных заданием на проектирование.

СП 118.13330.2011 «Общественные здания» п. 6,3

При повышенном уровне ответственности должен быть произведен расчет на аварийную ситуацию, определенную в задании на проектирование, требования к которой определены в Федеральном законе 384-ФЗ, статья 16, пункт 6.



Об удаляемых элементах конструктивной схемы

СП 385.1325800.2018 п.4.6

Для большепролетных зданий и сооружений в качестве локального разрушения следует рассматривать разрушение (удаление) одного из несущих элементов, в других случаях – согласно заданию на проектирование в зависимости от типа сооружения, но не менее одного из несущих элементов.

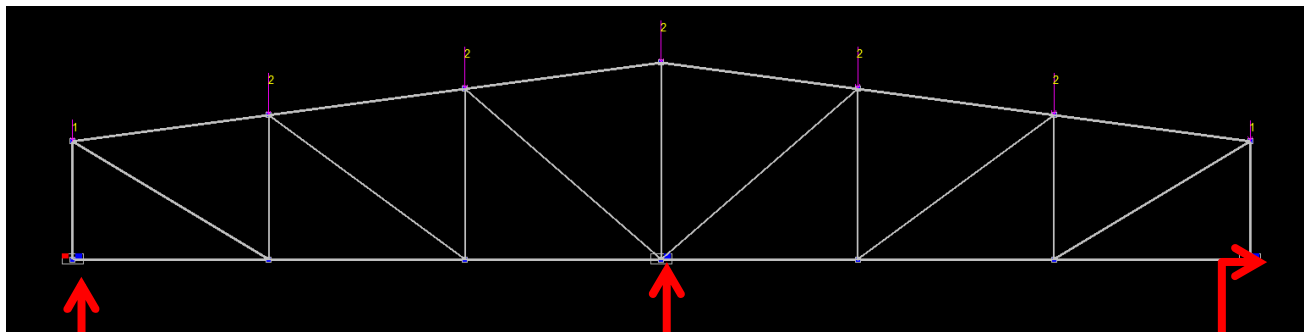
Зона локального разрушения может располагаться в любом месте сооружения и не должна приводить к прогрессирующему обрушению всего сооружения.

Для оценки устойчивости зданий и сооружений против прогрессирующего обрушения следует рассматривать наиболее опасные локальные обрушения.

Примечание: большепролетными считаются – производственные здания – пролеты 30,0 м, а для непроизводственных 18,0 м.

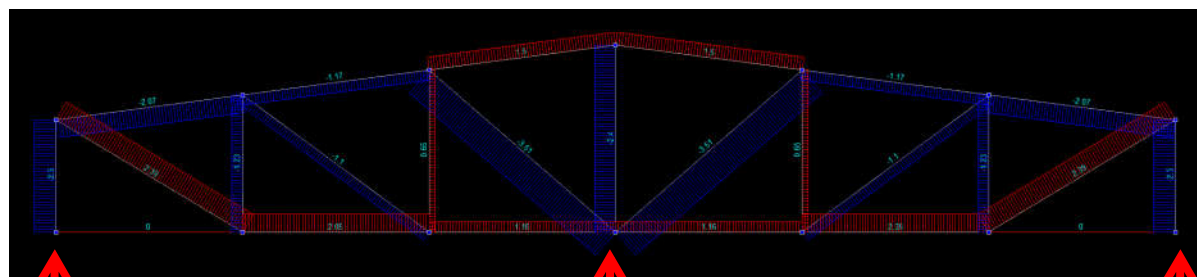
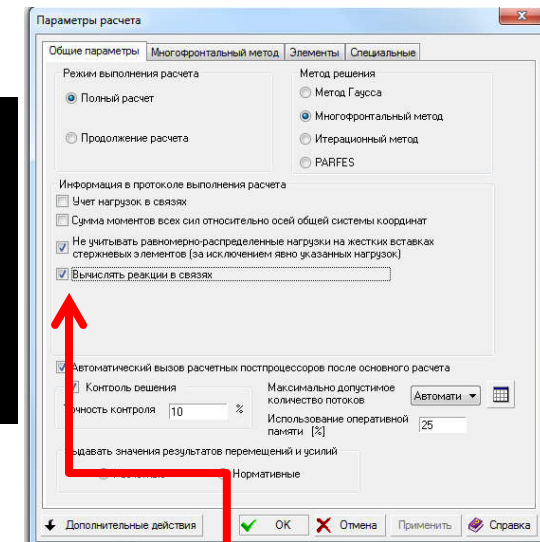
Расчетная схема

Исходная (первичная) неповрежденная схема



Шарнирно-
неподвижная опора

Шарнирно-подвижная опора

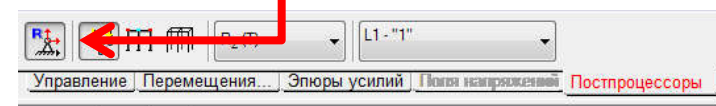


2,5 т

7,00 т

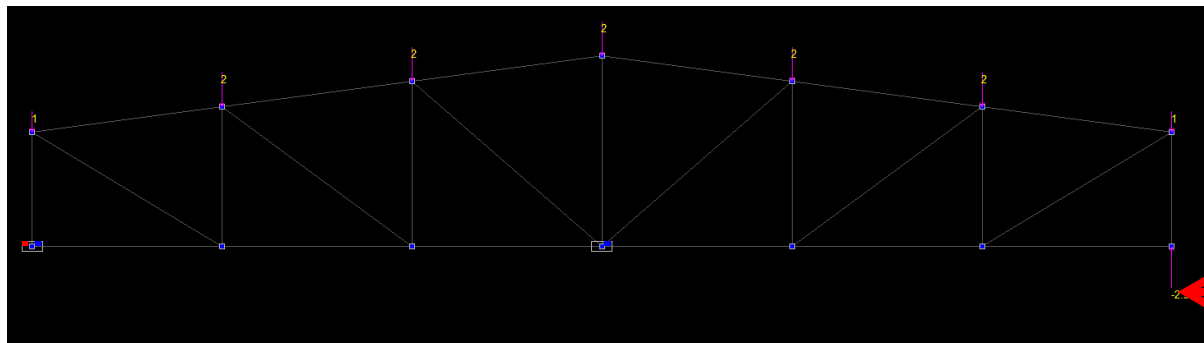
2,5 т

При задании опций
линейного расчета поставить
галочку «вычислить опорные
реакции» Далее в
постпроцессоре появится
кнопка, позволяющая узнать
опорные реакции

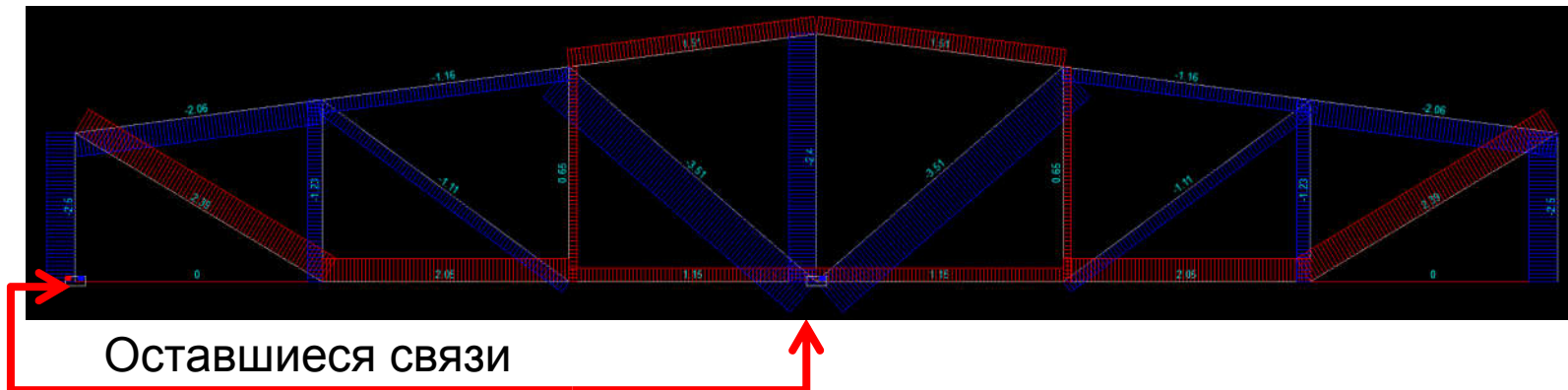


Расчетная схема

Одна из связей (правая) шарнирно-подвижная опора является исключаемой, мы можем её удалить и заменить на реакцию (в соответствии с принципом освобождения от связей):



Приложена сила,
равная реакции в
отброшенной связи

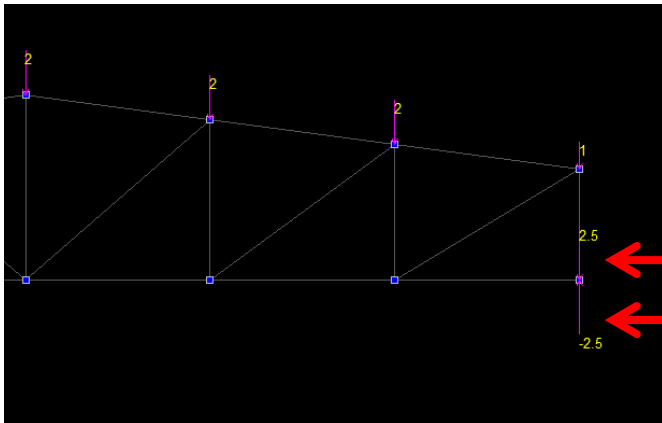


Оставшиеся связи

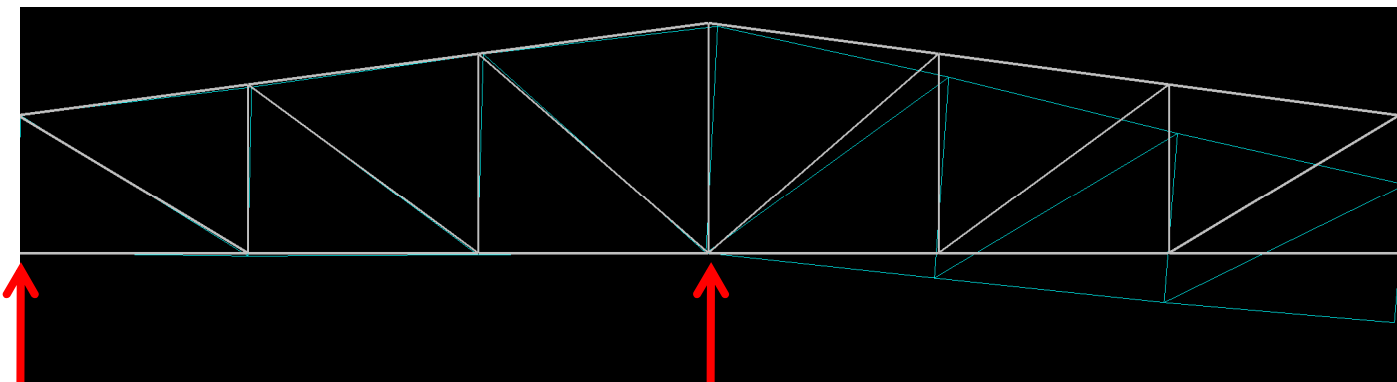
Эпюры остались без изменений в схеме с учетом отбрасывания связи и замены её действия реакцией

Расчетная схема

Для моделирования исключения связи = внезапному исчезновению реакции введем в месте отброшенной связи усилие равное усилию в связи, действующее противоположно реакции связи



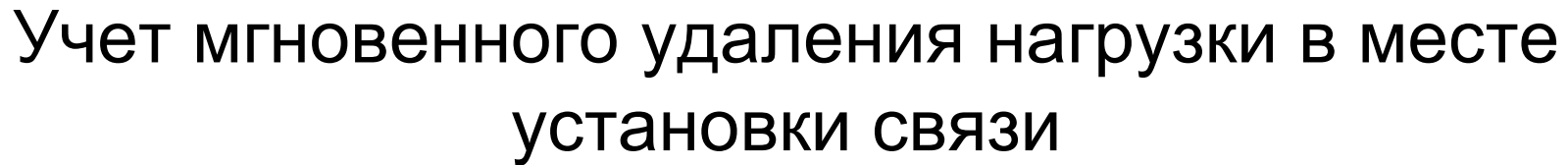
Одновременно действующие в противоположных направлениях силы, по величине равные реакции в отброшенной связи, приложенные в месте отбрасывания связи, в сумме дают 0. Это дает поврежденную вторичную расчетную схему, **но без внезапности удаления связи**. Выполним расчет и посмотрим на схему деформации:



Долгое время такой подход применялся для оценки НДС в системе с удаленной связью.

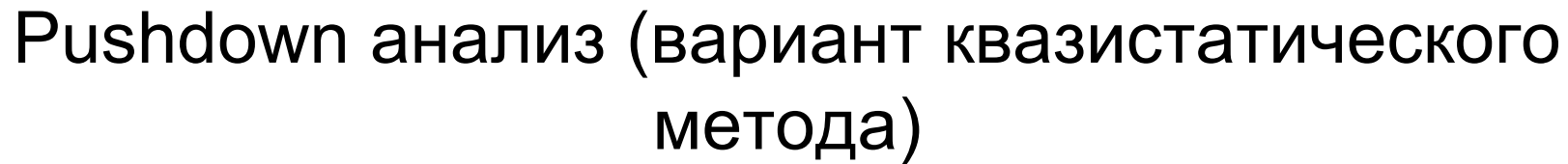
0 т.

12 т.



A diagram of a truss structure with a downward force of 2,5 T and an upward reaction of 17,0 T. The truss consists of a horizontal bottom chord and a top chord with several vertical and diagonal members. The forces are indicated by red arrows and text at the bottom of the diagram.

14

[illegible]

21,0 T

15



Реализация pulldown анализа в Scad

Согласно приложению Б к СП 385.1325800.2018 мгновенное удаление выключаемого элемента моделируется усилиями, определяемыми в этом элементе при расчете по первичной схеме, прикладываемыми во вторичной схеме с обратным знаком.

В режиме расчета на прогрессирующее обрушение SCAD мгновенное удаление разрушенных элементов при коэффициенте динамичности 2 моделируется усилиями в узлах, с которыми удаляемые элементы действуют на всю остальную схему и приложенными с обратным знаком, что соответствует алгоритму квазистатического расчета при мгновенном удалении элемента согласно приложению Б СП 385.1325800.2018. Если же коэффициент динамичности принимается равным 1, то усилия в узлах удаленных элементов принимаются равными нулю, что соответствует постепенному удалению элементов из расчетной схемы или эквивалентно линейно-статическому расчету схемы без разрушенных элементов. Также существует возможность учета вес обрушившихся конструкций с заданным коэффициентом динамичности.

Реализация pulldown анализа в SCAD

Согласно п.5.1 СП 385.1325800.2018

При расчете сооружений на устойчивость против прогрессирующего обрушения расчетные прочностные характеристики материалов в соответствии с СП 16.13330, СП 63.13330, СП 64.13330, СП 266.1325800 принимаются равными их нормативным значениям.

Данное требование п. 5.1 СП учитывается автоматически при использовании режима расчета на прогрессирующее обрушение

Согласно п. 5.2 Значения дополнительных условий работы, вводимых при расчете на устойчивость против прогрессирующего обрушения, приведены в приложении А.

Требование п. 5.2 СП учитываются при задании дополнительного коэффициента условий работы в конструктивных группах.

Коэффициент условий работы задается при назначении конструктивных групп элементов

Учет коррозии

Работа сечения с неустойчивой стенкой не допускается

Дополнительные коэффициенты условий работы

Расчет на прочность при сейсмике	0
Расчет на устойчивость при сейсмике	0
При особых (не сейсмических) воздействиях	1.1
Коэффициент понижающий расчетное сопротивление	1

Список групп

Конструктивный элемент

1245

Добавить

Удалить

Список конечных элементов

1 7 13 24

Применить

Справка

Дополнительная группа

Тип конструктивного

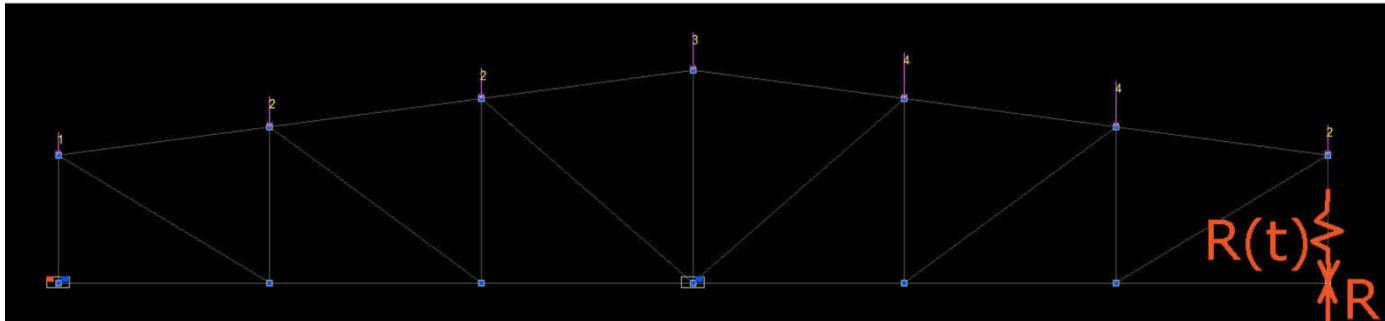
Элемент общего вида

Копировать

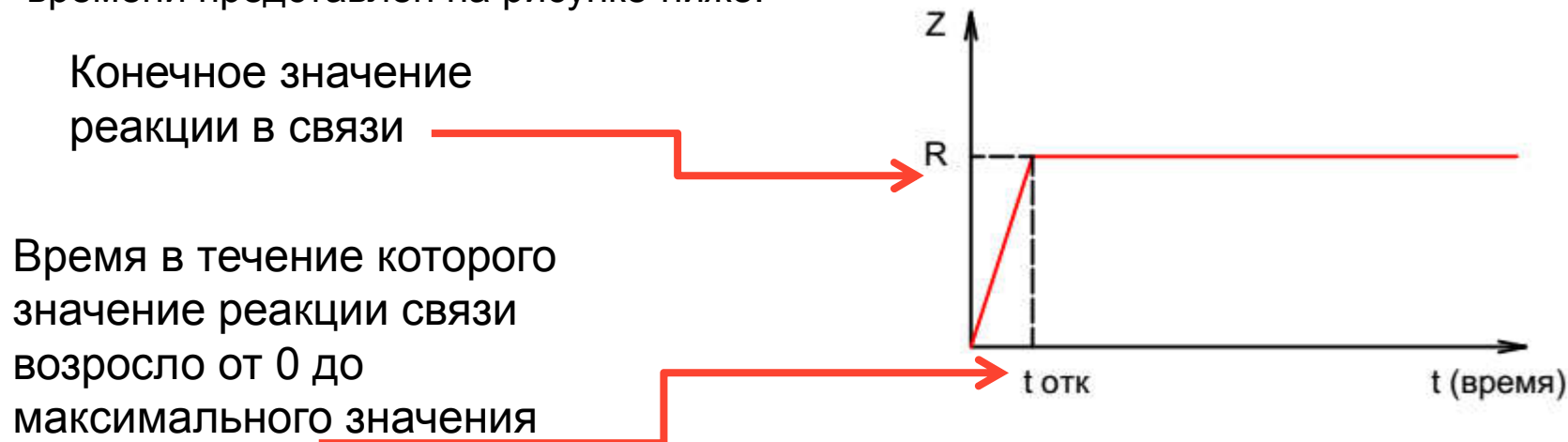
Выход

Динамический метод расчета

Учитывает изменение нагрузки при удалении связи моделируется приложением нагрузки обратного знака, которая меняет свое значение от нуля до полного значения за некоторое время. Т.е. Требуется решить динамическую задачу.



Мгновенное (очень быстрое) изменение нагрузки описывается билинейной зависимостью, в которой значение нагрузки, заменяющей реакцию изменяется от нуля (начало процесса) до полного значения за некоторое время $t_{отк}$. График зависимости изменения нагрузки от времени представлен на рисунке ниже:





Динамический метод расчета в методике ФАУ ФЦС

Федеральный научно-технический центр сертификации в строительстве (ФЦС) был создан в 1996 году в соответствии с приказом Минстроя России от 12.03.1996 №17-31 в целях реализации научно-технической и организационной политики Минстроя России при проведении работ по сертификации продукции в строительстве в рамках национальной и других сертификации, защиты отечественного строительного рынка от поставок некачественных и экологически вредных строительных материалов и конструкций. Методика динамического метода описана в разделе II.6 пособия ФАУ ФЦС состоит из трех основных этапов:

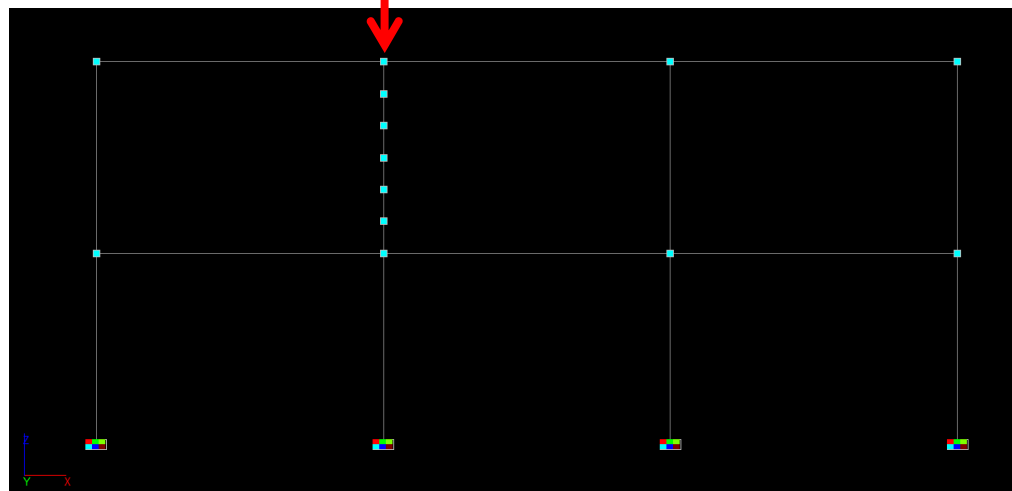
1. Постепенное линейное нагружение на промежутке времени, достаточном для нивелирования динамических эффектов;
2. Приложение инициирующего воздействия за промежуток времени, равный $1/10$ основного периода собственных колебаний **удаляемого элемента**;
3. Динамический расчет конструкции с удаленным элементом в нелинейной постановке методами прямого интегрирования уравнений динамики во времени со стандартными параметрами демпфирования (рекомендуемые параметры относительного демпфирования приведены в таблице II.1 пособия).

Тип конструкции	Относительное демпфирование
Стальные конструкции на болтовых срезных соединениях	5 %
Стальные конструкции на сварке или фрикционных болтах	2%
Железобетонные конструкции	5%

Оценка времени иницирующего воздействия

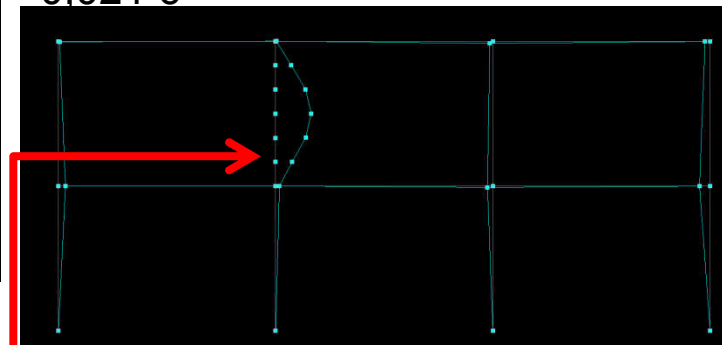
Метод 1. По пособию ФАУ ФЦС для расчета времени иницирующего воздействия как $1/10$ основного периода собственных колебаний удаляемого элемента рассматривается схема в которой удаляемый элемент в составе общей схемы для получения динамических степеней свободы по длине элемента определяется достаточно подробно (подробность разбивки должна составлять порядка 6-ти элементов) и выполняется модальный анализ. В рассматриваемом случае время отказа составит: $t_{отк} = 0,021/10 = 0,0021$ сек.

Рассмотрим схему с исключаемым элементом, разобьем его на количество элементов не менее 6-ти:



Ярко выраженная работа
исключаемого элемента

Произведем модальный анализ системы, получим периоды и формы колебаний системы, из них выберем ту, которая в наибольшей степени соответствует работе именно исключаемого элемента: период 0,021 с

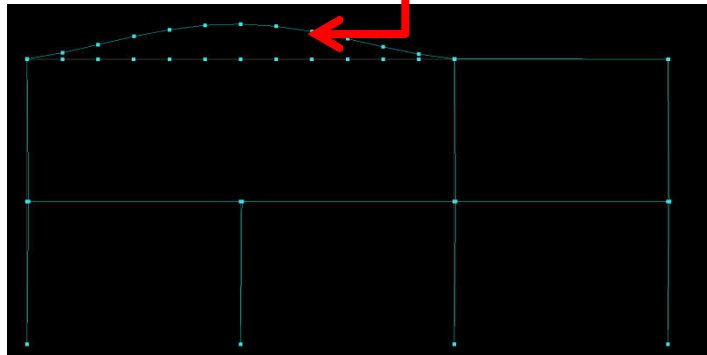


Оценка времени инициирующего воздействия

Метод 2. По рекомендации американских норм «Progressive collapse analysis and design guideline (GSA, 2013)» $t_{отк} \leq 0.1T$, где T есть период колебаний конструкции без выбывшего элемента по форме колебаний напоминающей статическую деформацию системы. В рассматриваемом случае удалим колонну и также определим собственные частоты конструкции:

Также разобьем примыкающие стержни на большее число элементов

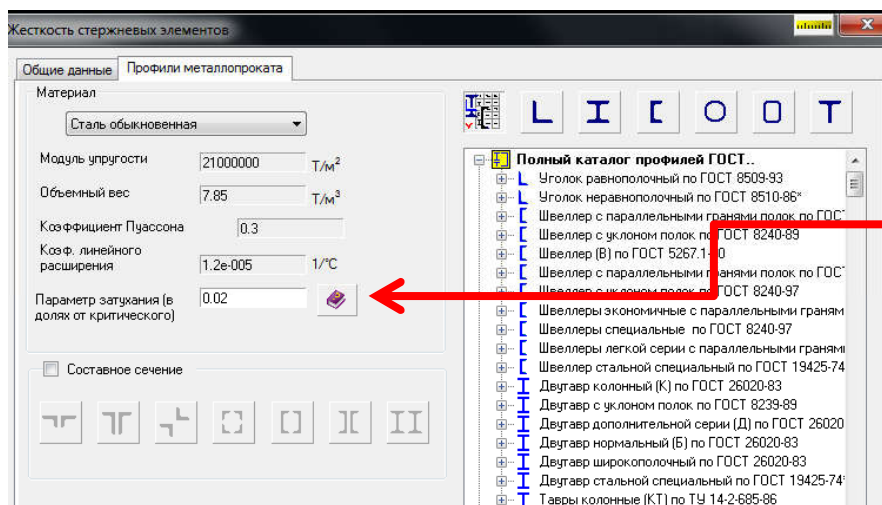
$$t_{отк} = 0.1624 / 10 = 0.016 \text{ с}$$



Метод 3. Справочник по динамическим воздействиям Коренева и Рабиновича от 1972 г (стр. 95) по аналогии с расчетом на удар, если нельзя оценить время воздействия расчетным или опытным путем, но имеется уверенность, что оно достаточно мало, можно принимать в запас прочности и жесткости конструкций $t_{отк} = 0,001 \text{ сек.}$

Задание параметров расчета на прогрессирующее обрушение

В программном комплексе SCAD параметры затухания в долях от критического задается в диалоговом окне задания жесткостных свойств элемента (см. Табл. на слайде 19)



Задание параметра затухания необходимо только при проведении анализа «прямым динамическим методом», т.е. если применяется прямое интегрирование уравнений динамики.

Если выполняются линейные расчеты, расчеты на сейсмику, то этот параметр затухания не нужен.

Шаг интегрирования по времени назначается из соображения $[0.01-0.001] T_1$, где T_1 – период основного тона;

Если о динамическом поведении конструкции ничего не известно, то шаг выдачи результатов рекомендуется назначить равномерным, примерно через 50-100 шагов интегрирования по времени.

Сгустить шаг интегрирования во времени и сравнить результаты двух расчетов. Если расхождение небольшое, то второй результат считать окончательным.



Нагрузки на прогрессирующее обрушение

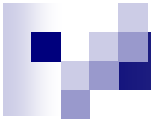
В СП 20.13330.2011 п. 4.3 В особых сочетаниях коэффициент надежности по нагрузке для постоянных, длительных и кратковременных нагрузок следует принимать равным единице, за исключением случаев, оговоренных в других нормативных документах. То есть используются нормативные нагрузки.

В СП 20.13330.2016 п. 4.3 Расчетные значения особых нагрузок устанавливается в соответствующих документах или в задании на проектирование.

СП 267.1325800.2016 «Здания и комплексы высотные» п. 8.3.2.1 и 8.3.2.2 В расчет включают постоянные и временные длительные нагрузки. Коэффициенты сочетаний надежности по нагрузке принимают равными 1.

СП 20.13330.2011 п. 6.5 Для особых сочетаний коэффициенты сочетаний для всех кратковременных нагрузок принимают равными 0,8. В особых сочетаниях нагрузок, включающих взрывные воздействия, нагрузки вызываемые пожаром, столкновением транспортных средств с частями сооружений, кратковременные нагрузки допускается не учитывать.

Пособие по прогрессирующему обрушению п. II.2.1 и II.2.2 В расчет включают постоянные и временные длительные нагрузки. Коэффициент сочетания коэффициенты надежности принимают равными 1.



Характеристики материалов, коэффициент надежности по ответственности, коэффициенты условий работы

СП 385.13258800.2018

П. 5.1. Расчетные прочностные характеристики материалов принимают равными их нормативным значениям, а для реконструируемых зданий и сооружений – с учетом особого предельного состояния. Деформативные характеристики согласно приложению Е.

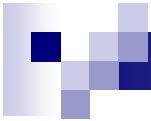
П. 6.3. коэффициент надежности по ответственности следует принимать равным 1. Допускается согласно заданию на проектирование назначение заказчиком:

$\gamma_p = 1,1$ – для зданий высотой от 75 до 200 м или пролетом от 50 до 120 м или консольными конструкциями с вылетом от 10 до 20 м;

$\gamma_p = 1,2$ – для зданий высотой более 200 м или пролетом более 120 м или консольными конструкциями с вылетом более 20 м.

П. А.1. Нормативные характеристики сопротивления материалов для бетонных и железобетонных конструкций следует умножать на дополнительный коэффициент условий особого предельного состояния, принимаемый равным 1,15 (то же по приложению Б СП 296.1325800.2017).

П. А.2. Коэффициент условий работы особого предельного состояния для пластических сталей с пределом текучести принимать равным 1,1 (то же по приложению Б СП 296.1325800.2017).



Проверки при расчетах на прогрессирующее обрушение

СП 385.1325800.2018

П.4.5 Защита сооружений от прогрессирующего обрушения обеспечена, если для любых элементов и их соединений соблюдается условие:

$$F \leq S$$

Где F – усилия в конструктивных элементах или их соединениях, определяемые расчетом;

S - несущая способность конструктивных элементов и их соединений.

Приложение Б.

Если при проверке условие прочности в каких-либо сечениях (узлах, связях) не выполняется, то производят корректировку вторичной расчетной схемы, в которой исключаются эти сечения, проводят перерасчет конструктивной системы и вновь проверяют условия прочности сечений (узлов, связей).

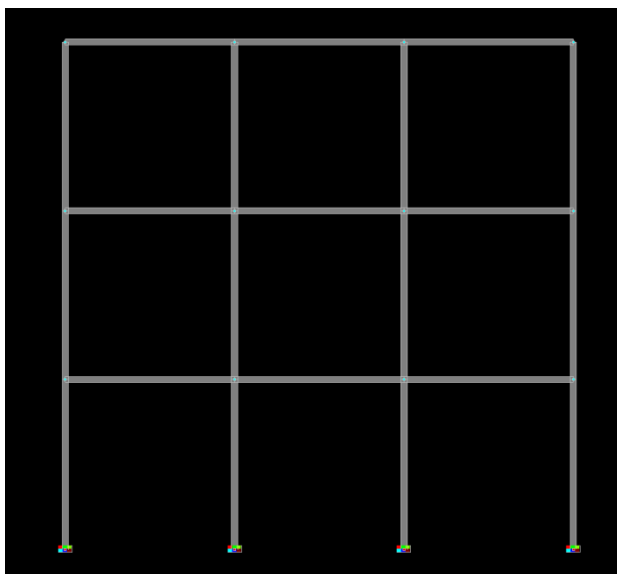
П. 4.6. устанавливает размеры зон локального разрушения. Зона локального разрушения может располагаться в любом месте сооружения и не должна приводить к прогрессирующему обрушению всего сооружения.

Пособие по прогрессирующему обрушению, п. II.1.4

Прогибы изгибаемых элементов конструктивной схемы для особого предельного состояния при условии минимально допустимой длины зоны опирания во всех случаях не должны превышать $1/50$ длины пролета.

Пример расчета на прогрессирующее обрушение в SCAD

Рассмотрим следующую расчетную схему:



Жесткое закрепление всех опорных узлов

Заданы следующие загрузки:

Сохранение загрузки

№: 3 Имя: Кратковременная

Тип загрузки: Кратковрем. Вид нагрузки: Полные наг. ☐ Нормативная нагрузка

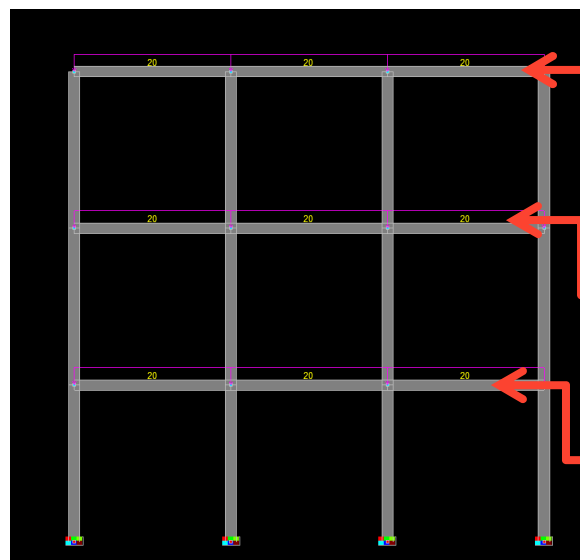
Коэффициент надежности по нагрузке: 1.2 Доля длительности: 0.35

№	Загрузка	Тип загрузки	Вид нагрузки	Коэффициент надежности по нагрузке	Доля длительности	Нормативное нагружение
1	Собственный вес	Постоянные нагрузки	Вес металла	1.05	1	
2	Постоянная	Постоянные нагрузки	Вес бетона	1.1	1	
3	Кратковременная	Кратковременные на	Полные наг	1.2	0.35	

2016

☐ Сохранить и продолжить задание нагрузок
☒ Сохранить и перейти к созданию нового нагружения

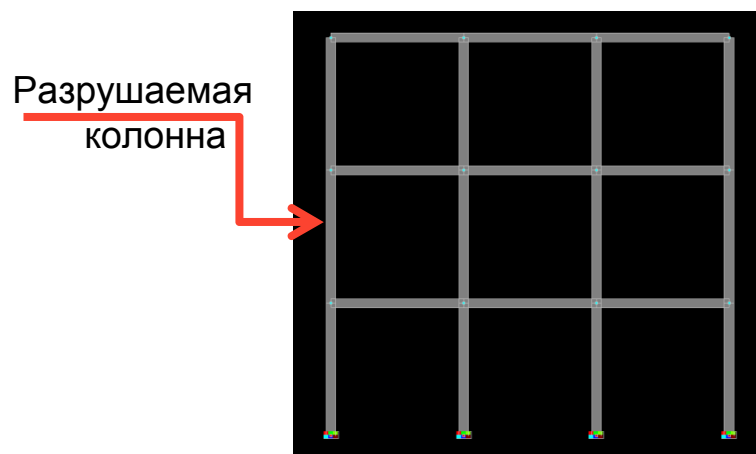
OK Отмена Справка



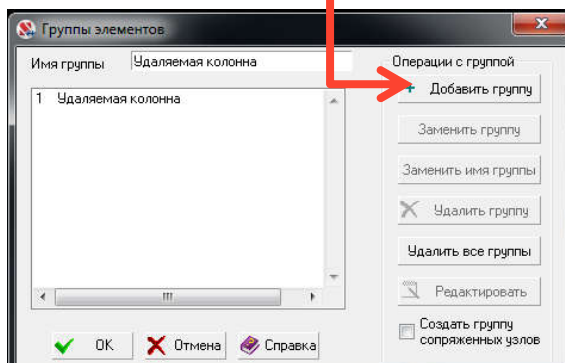
Постоянные и временные нагрузки заданы как равномерно-распределенные нагрузки, действующие на ригели расчетной схемы.

Задание нагрузки от веса разрушенной колонны после её падения на фрагмент схемы

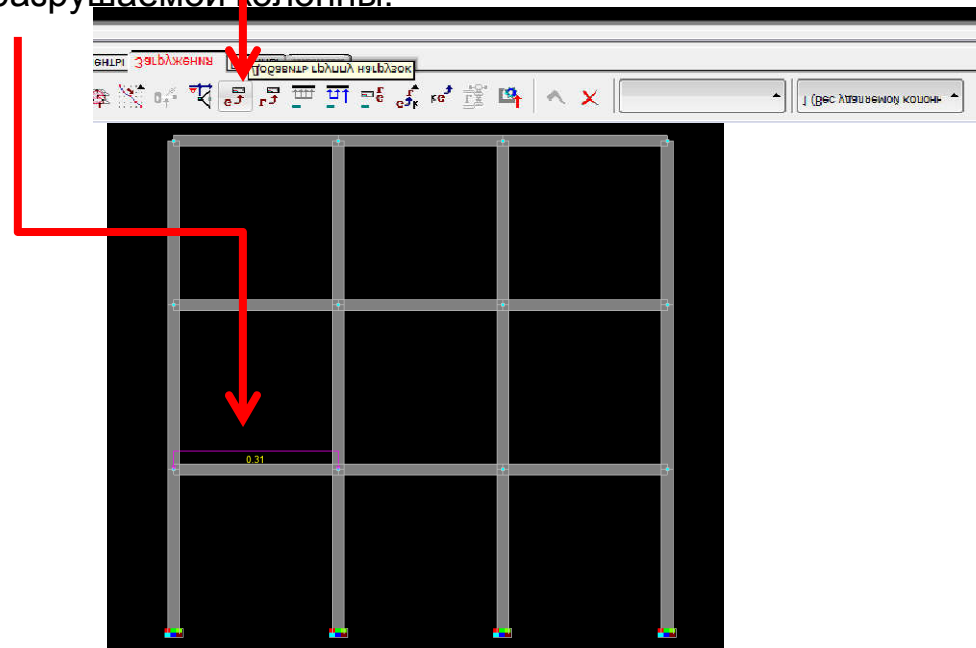
В рассматриваемой схеме будем считать, что разрушению подвергается крайняя колонна второго этажа каркаса здания



Удаляемая колонна помещена в отдельную группу с одноименным названием

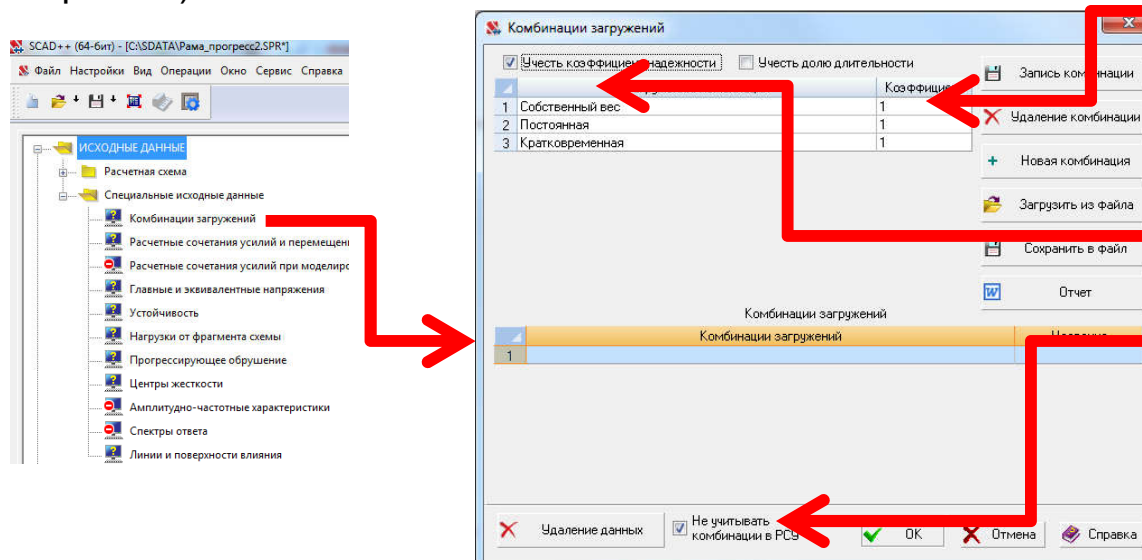


В рамках расчетной модели будем считать, что разрушенная часть колонны упадет целиком на один близкорасположенный пролет перекрытия пола второго этажа. Чтобы это учесть в расчетной схеме создадим группу нагрузок, состоящую только из нагрузки, приложенной к ригелю 2-го этажа и равной весу разрушаемой колонны.

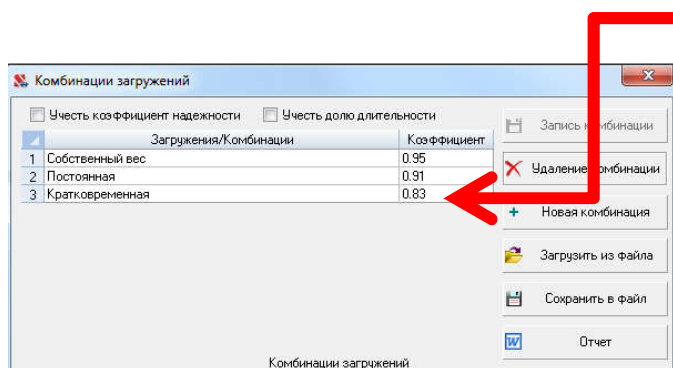


Задание параметров расчета на прогрессирующее обрушение

Для расчета прежде всего нужно создать комбинацию загружений (осуществляется из дерева проекта):



Устанавливаем коэффициенты равными 1, а также ставим галочки в поле «Учесть коэффициент надежности» и «Не учитывать комбинации в РСУ», нажимаем кнопку «Записать комбинации»

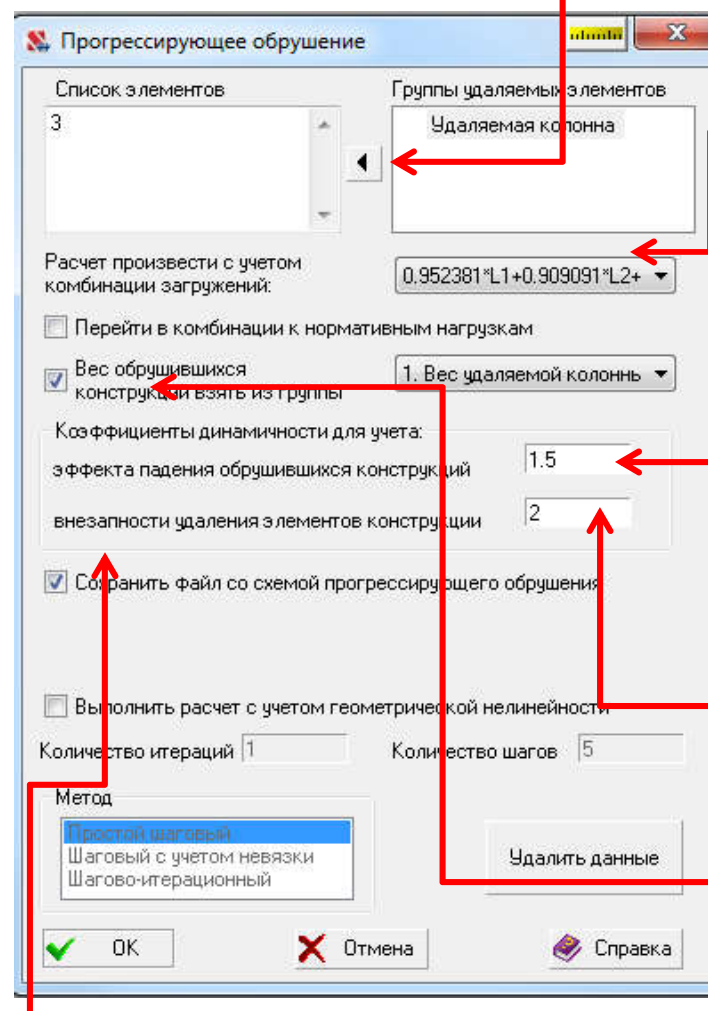
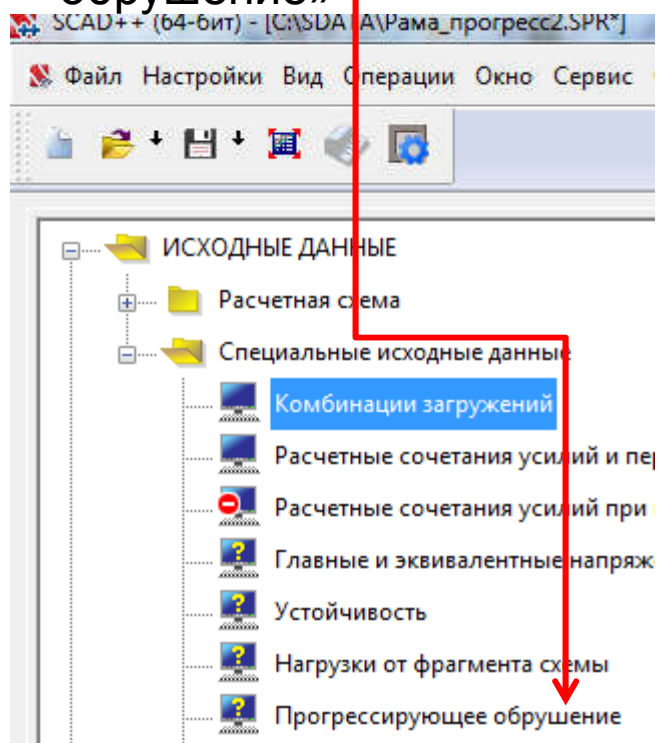


СП 20.13330.2011 п. 6.5 Для особых сочетаний коэффициенты сочетаний для всех кратковременных нагрузок принимают равными 0,8. (См. Слайд 23) В этой связи полученный коэффициент нужно изменить (умножить на 0,8), окончательно получим $0,83 \times 0,8 = 0,67$, внесем этот параметр и вновь запишем комбинацию:

Комбинации загружений	
Комбинации загружений	
1	$0.952381 * L1 + 0.909091 * L2 + 0.67 * L3$

Задание исходных данных для прогрессирующего разрушения (продолжение)

Из дерева проекта
входим в меню
«Прогрессирующее
обрушение»



Выбрать
колонну для
удаления

Ранее
сформированная
комбинация

Коэффициент
динамичности
для упавшей
колонны

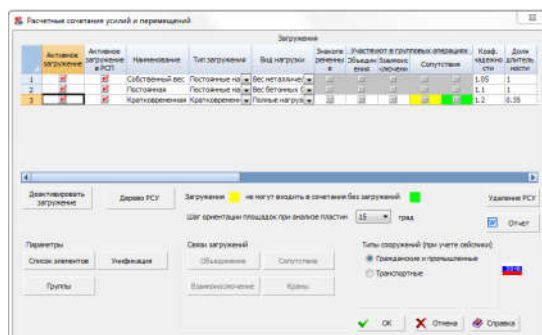
Коэффициент
динамичности
для учета
удаления
колонны

Позволит
учесть вес
упавшей
колонны

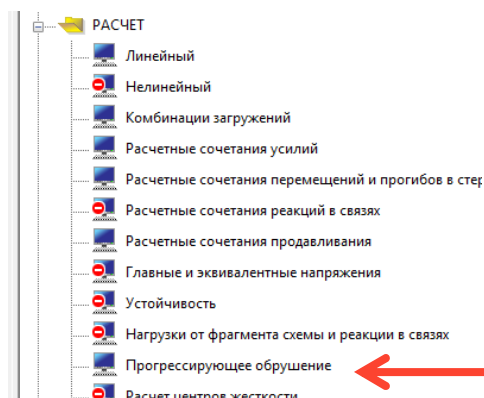
Поставить галочку для сохранения SCADом расчетной
схемы без колонны, но с нагрузкой от фрагмента схемы

Расчет здания на прогрессирующее обрушение (продолжение)

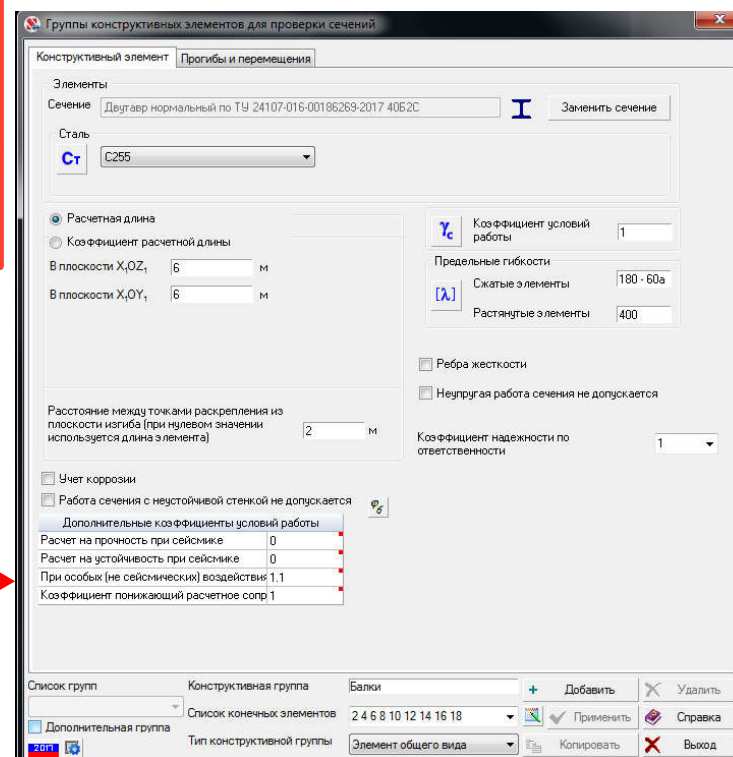
Формирование РСУ



После создания РСУ выполним обычный линейный полный расчет. И только после этого выполняем расчет прогрессирующего обрушения из «Дерева проекта»



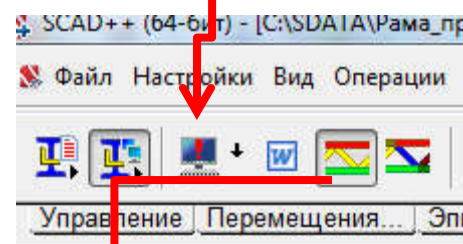
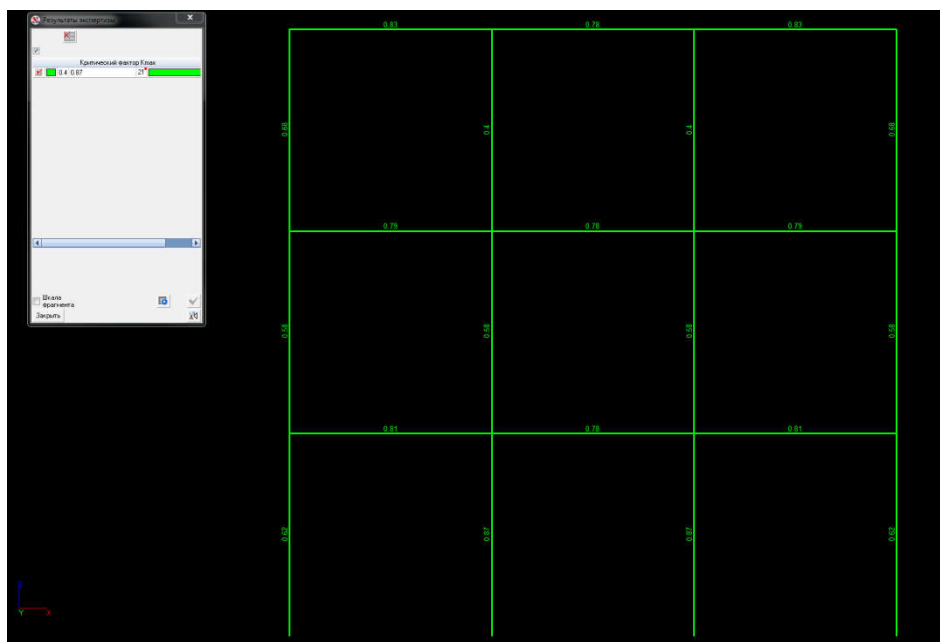
Далее перемещаемся в графический анализ и создаем группы конструктивных элементов--балки и колонны, например, так:



Для учета особых сочетаний задан коэффициент 1,1, который будет учтен в прогрессирующем обрушении

Расчет на прогрессирующее разрушение (продолжение)

Так как общий линейный расчет выполнен, РСУ задано, конструктивные группы элементов сформированы, то возможным является проверка несущей способности сечений рамы до разрушения колонны, для проведения расчета воспользуемся кнопкой

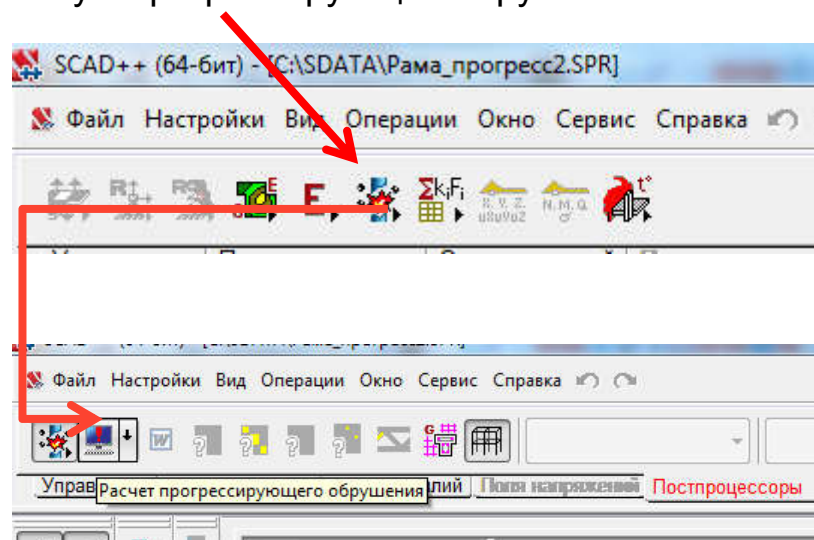


Все элементы рамы без учета прогрессирующего обрушения обладают требуемой несущей способностью. Максимальный коэффициент использования ригелей 0,79-0,83.

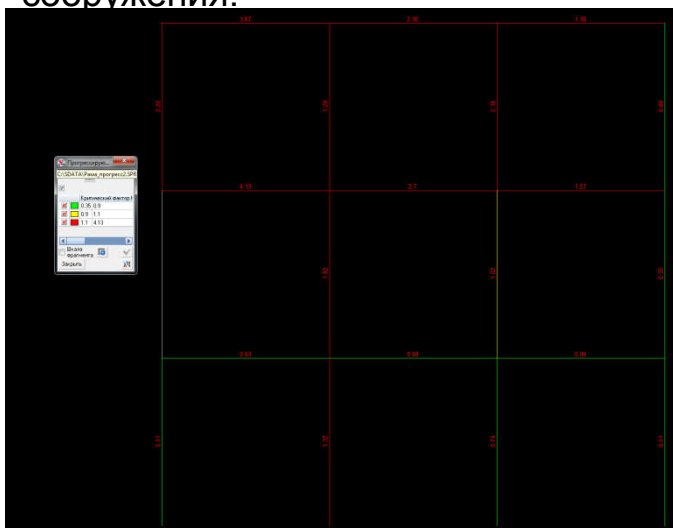
Проверка сечений с учетом развития прогрессирующего обрушения

Для проверки работоспособности конструкции после развития прогрессирующего обрушения заходим в постпроцессоры и находим там кнопку «Прогрессирующее обрушение»

Далее выполняем «Расчет прогрессирующего обрушения», который заключается в проверке оставшихся элементов рамы после удаления исключаемой части колонны и видим, что рама уже не удовлетворяет условиям, предъявляемым к строительным конструкциям, то есть выключение крайней колонны является критически важным для исследуемого сооружения.



Из результатов расчета видно, что большая часть ригелей второго и третьего этажа схемы, а также одна из нижних колонн, а также все верхние колонны расчетной схемы не проходят.



PCY прогрессирующего разрушения

Рассматривая информацию о каждом элементе рамы можно увидеть PCY прогрессирующего обрушения, где отдельным слагаемым выступает величина G1- величина нагрузки в элементе, возникающей в результате падения конструкции колонны на близкорасположенный пролет.

Информация об элементе

Указание на схеме

Номер элемента: 2

Нагрузки

Шарниры

Местные оси

Жесткие вставки

Коэффициенты постели

Преднапряжение

Сопротивление сечений

Сопротивление сечений (прогрессирующее обрушение)

Сталь. Факторы

Напряжения в сечении

Эпюры усилий

Эпюры прогибов

Главные и эквивалентные напряжения

PCY

PCY (прогрессирующего обрушения)

Прогрессирующее обрушение

PC прогибов

Дополнительные данные

Узлы: выбрать

Выборать примыкающие элементы

Выборать

[Элемент № 2] Расчетные сочетания (прогрессирующего обрушения) в элементе

Тип комбинации: Все

Номер сечения: Все

Сортировать по: Не сортиров.

Сечение	Тип комбинации	N		M _k		M _y	M _z	Q _y	Q _z	r _x
		T	T _m	T _m	T _m					
0.952381*L1+0.909091*L2+0.67*L3+G1										
1	Расчетные значения	-29.19	0	-41.22	71.69	0	0	0	0	0
1	Расчетные длительные	-29.19	0	-41.22	71.69	0	0	0	0	0
2	Расчетные значения	-29.19	0	58.48	-5.22	0	0	0	0	0
2	Расчетные длительные	-29.19	0	58.48	-5.22	0	0	0	0	0
3	Расчетные значения	-29.19	0	-72.56	-82.14	0	0	0	0	0
3	Расчетные длительные	-29.19	0	-72.56	-82.14	0	0	0	0	0

2016

Выход Справка

Расчетная комбинация усилий в элементе

Результаты проверки стержней рамы от действия прогрессирующего разрушения

Также по каждому конкретному стержню рамы можно посмотреть результаты проверки по различным факторам, в качестве примера приведем «зеленый стержень рамы», для которого условия прочности и устойчивости выполнены даже в схеме с удаленной колонной и результаты проверки для «красного стержня рамы», для которого ряд условий (факторов) не удовлетворяет требованиям нормы. Информация также может быть получена при индивидуальном рассмотрении каждого из элементов.

«красный стержень»

«зеленый стержень»

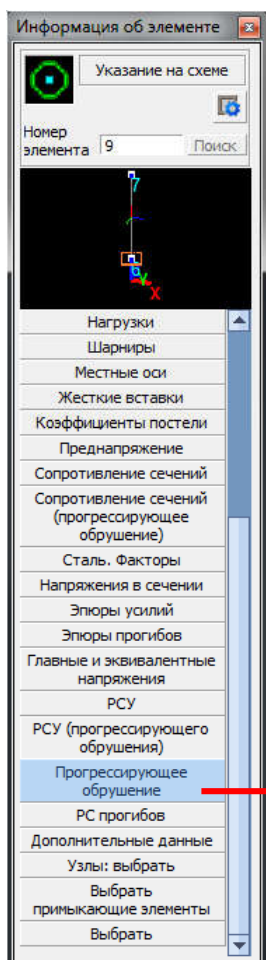


Диаграмма факторов [Конструктивная группа Колонны. Элемент № 9] [СП 16.13330.2017 с изменениями №1,2]

Проверка	п. 8.2.1	Коэффициент	Комбинация
Прочность при действии изгибающего момента M_x	п. 8.2.1	0.9	0.952381*L1+0.909091*L2+0.67*L3+G1
Прочность при действии поперечной силы Q_z	п. 8.2.1	0.15	0.952381*L1+0.909091*L2+0.67*L3+G1
Прочность при совместном действии продольной силы и изгибающих моментов без учета пластичности	п. 9.1.1	1.69	0.952381*L1+0.909091*L2+0.67*L3+G1
Устойчивость при сжатии в плоскости XOY (XOU)	пп. 7.1.3, 7.2.2	1.07	0.952381*L1+0.909091*L2+0.67*L3+G1
Устойчивость при сжатии в плоскости XOZ (XOV)	пп. 7.1.3, 7.2.2	0.85	0.952381*L1+0.909091*L2+0.67*L3+G1
Устойчивость в плоскости действия момента M_x при внецентренном сжатии	пп. 9.2.2, 9.2.10	1.63	0.952381*L1+0.909091*L2+0.67*L3+G1
Устойчивость из плоскости действия момента M_x при внецентренном сжатии	пп. 9.2.4, 9.2.5, 9.2.8, 9.2.10	1.92	0.952381*L1+0.909091*L2+0.67*L3+G1
Предельная гибкость стенки из колонны местной устойчивости	пп. 7.3.2, 7.3.11, 8.5.1-8.5.8, 9.4.2	0.31	0.952381*L1+0.909091*L2+0.67*L3+G1

Диаграмма факторов [Конструктивная группа Балки. Элемент № 8] [СП 16.13330.2017 с изменениями №1,2]

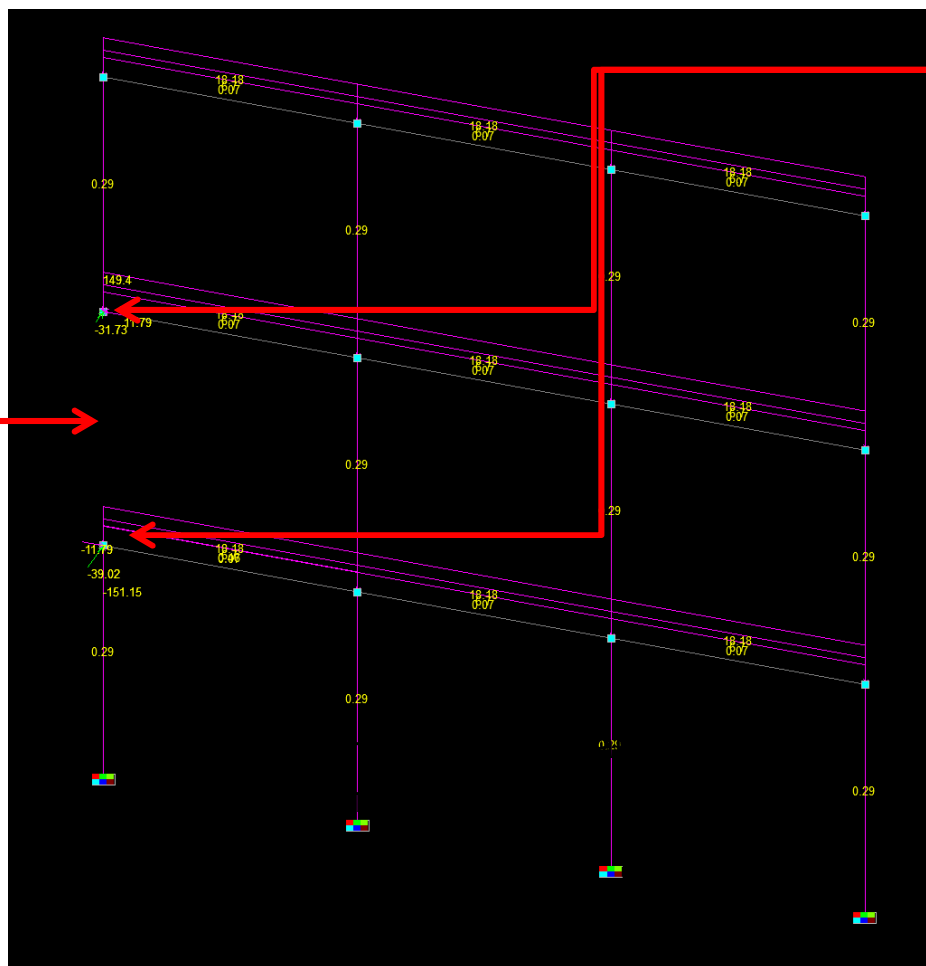
Проверка	п. 8.2.1	Коэффициент	Комбинация
Прочность при действии изгибающего момента M_x	п. 8.2.1	0.55	0.952381*L1+0.909091*L2+0.67*L3+G1
Прочность при действии поперечной силы Q_z	п. 8.2.1	0.61	0.952381*L1+0.909091*L2+0.67*L3+G1
Прочность при совместном действии продольной силы и изгибающих моментов без учета пластичности	п. 9.1.1	0.6	0.952381*L1+0.909091*L2+0.67*L3+G1
Устойчивость при сжатии в плоскости XOY (XOU)	пп. 7.1.3, 7.2.2	0.07	0.952381*L1+0.909091*L2+0.67*L3+G1
Устойчивость при сжатии в плоскости XOZ (XOV)	пп. 7.1.3, 7.2.2	0.05	0.952381*L1+0.909091*L2+0.67*L3+G1
Устойчивость в плоскости действия момента M_x при внецентренном сжатии	пп. 9.2.2, 9.2.10	0.52	0.952381*L1+0.909091*L2+0.67*L3+G1
Устойчивость из плоскости действия момента M_x при внецентренном сжатии	пп. 9.2.4, 9.2.5, 9.2.8, 9.2.10	0.68	0.952381*L1+0.909091*L2+0.67*L3+G1
Предельная гибкость стенки из колонны местной устойчивости	пп. 7.3.2, 7.3.11, 8.5.1-8.5.8, 9.4.2	0.12	0.952381*L1+0.909091*L2+0.67*L3+G1

Обычными способами запроектированное здание чаще всего не будет сопротивляться прогрессирующему разрушению

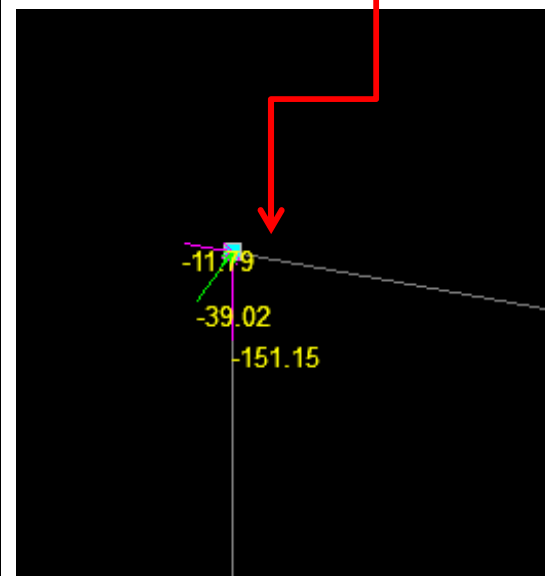
Реализация прямого динамического метода в SCAD

На предыдущем этапе решения задачи при использовании квазистатического метода был сохранен файл с названием: «Рама_прогресс2(Destr).spr». Открыв его можно увидеть следующее:

Колонна
автоматически
удалена
программой

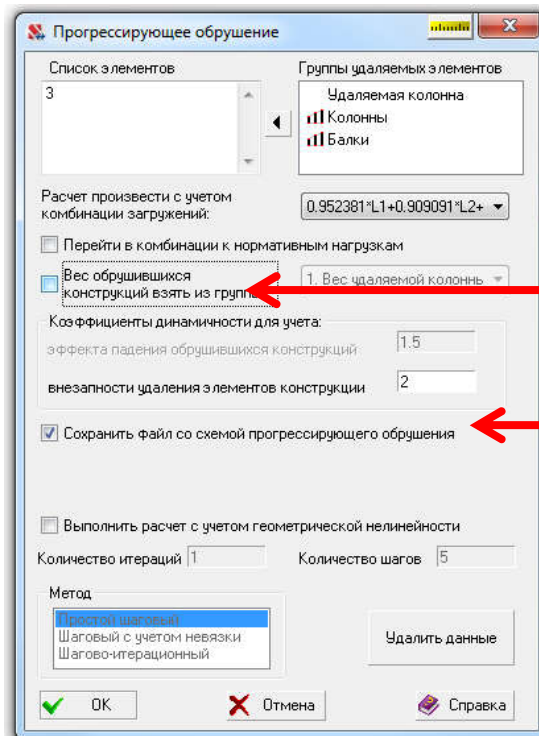


В соответствии с принципом освобождаемости от связей вместо нее в расчетной схеме присутствует нагрузка, заданная с противоположным знаком от фрагмента схемы.



Получение расчетной схемы для динамического расчета без учета падающего фрагмента колонны

Так как при проведении динамического расчета важно, что падающая колонна начинает действовать на схему со значительным опозданием (по сравнению с эффектом от самого разрушения колонны), то при выполнении динамического расчета конструкции необходимо выполнять расчет без учета веса упавшей части конструкции колонны. Для этого придется заново произвести расчет на прогрессирующее обрушение исходной задачи, но в окне опций убрать галочку, отвечающую за учет нагрузки от веса падающего фрагмента и, соответственно, данная нагрузка будет отсутствовать и в полученной исходной схеме, записанной в файл исходных данных для проведения динамического расчета.



Необходимо убрать галочку с пункта, позволяющего производить учет разрушенного фрагмента расчетной схемы.

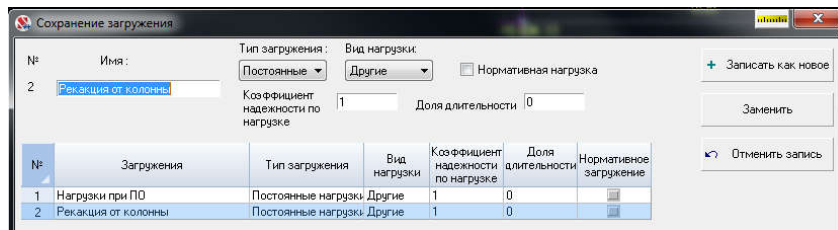
При повторном выполнении расчета на прогрессирующее обрушение вновь будет записан файл, но уже без учета упавшей колонны.



Получены иные значения реакций от отбрасываемой колонны (в данном случае меньше).

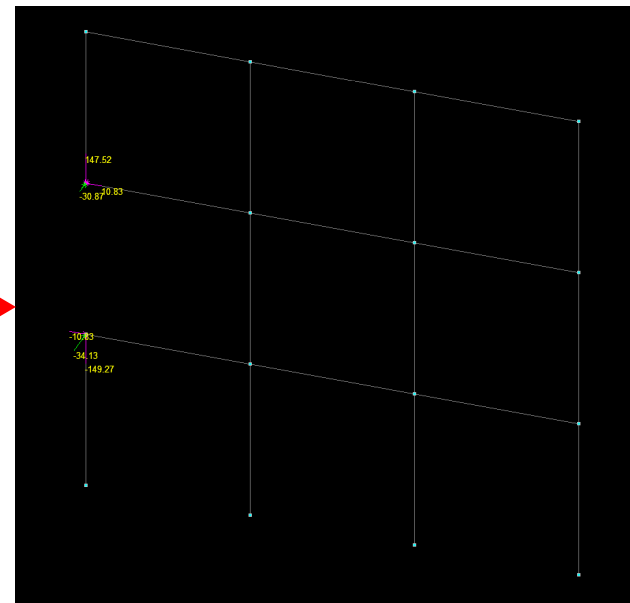
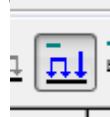
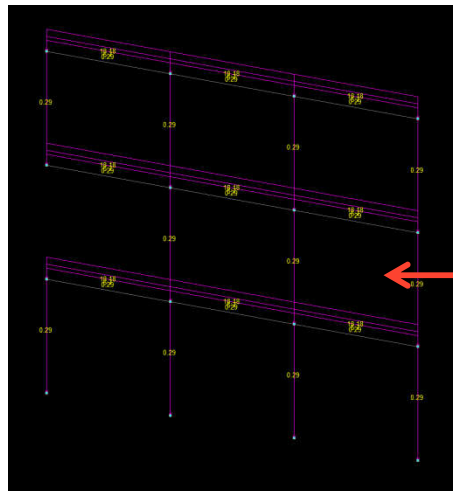
Создание загрузок для прямого динамического расчета

Дважды сохраним полученные автоматически из псевдодинамического расчета нагрузки в двух различных загрузках с различными названиями:



Во втором загрузке «Реакция от колонны», наоборот удаляются все равномерно распределенные нагрузки:

Далее в первом загрузке удалим все узловые нагрузки, т.е. нагрузки от реакции удаляемой колонны:



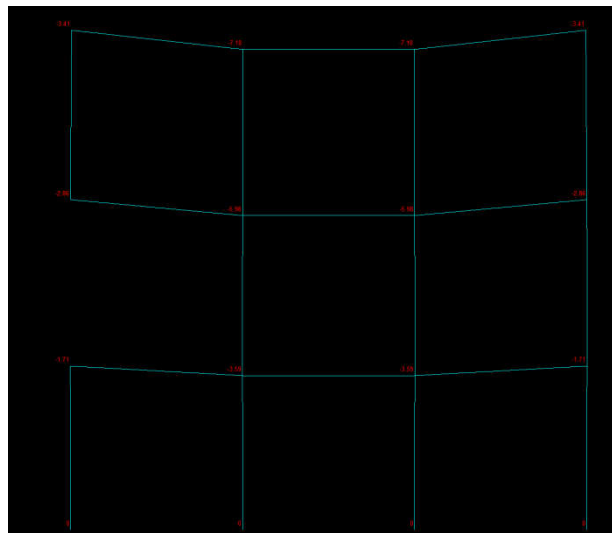
После удаления соответствующих нагрузок нужно не забыть сохранить текущее загрузке с заменой.

Проверка эквивалентности поведения схемы под воздействием двух сформированных загрузжений схеме с колонной

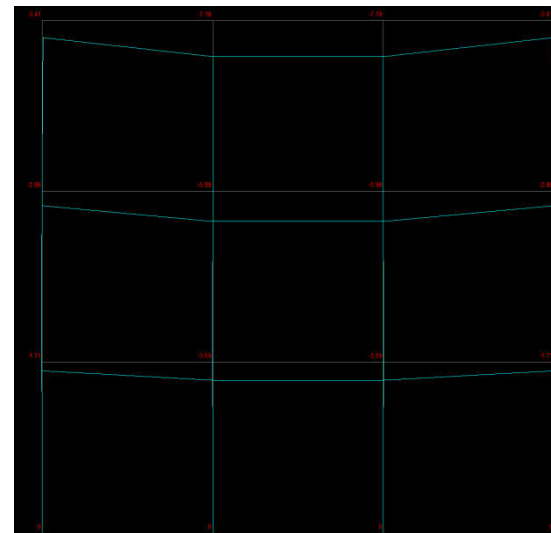
Так как приложенные узловые силы направлены противоположно усилиям в колонне, то при формировании комбинации загрузжений их нужно учесть со знаком минус.

Полученный характер перемещений расчетной схемы от комбинации L1-L2 иллюстрирует правильность определения автоматического определения опорных реакций от удаляемой колонны. Т.е. два полученных на предыдущем слайде загрузжения с совокупности эквивалентны расчету рамы с колонной.

Рама без колонны



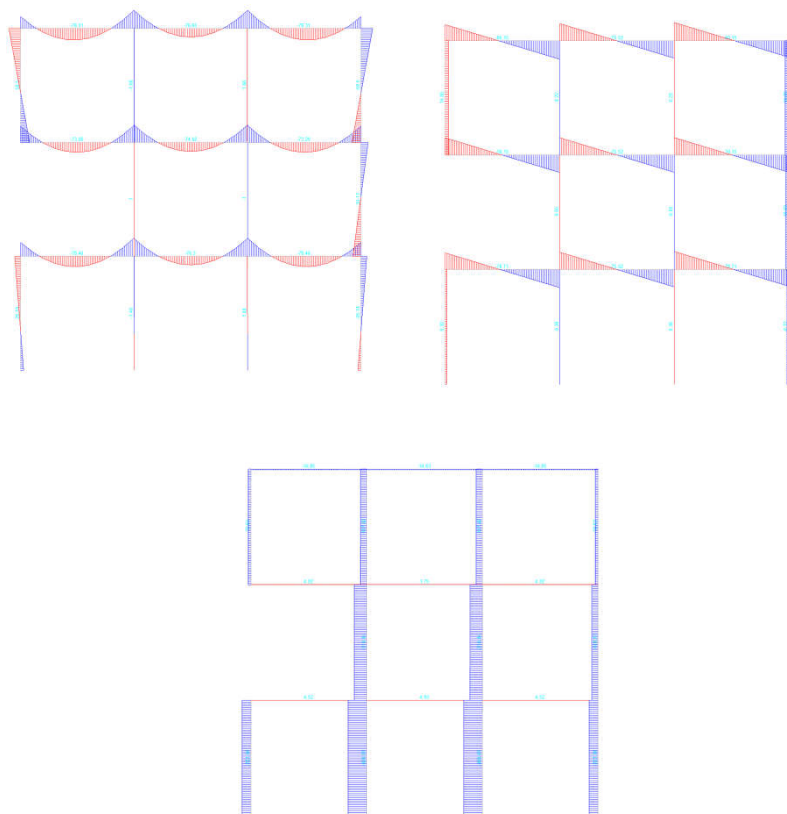
Рама с колонной



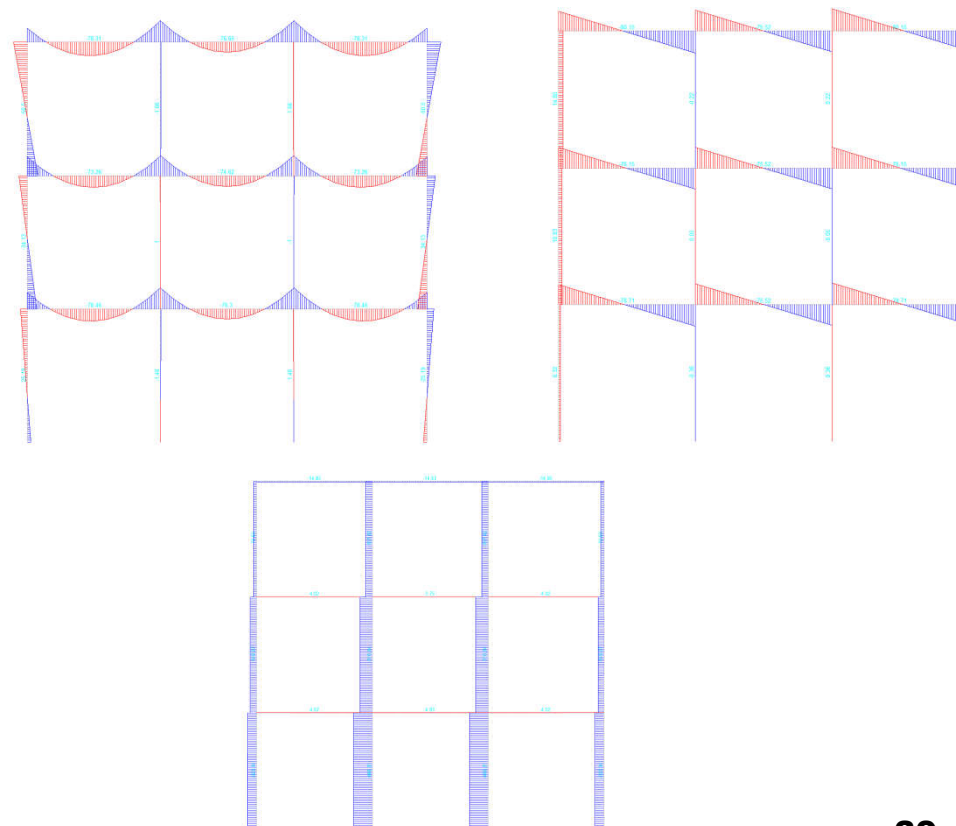
Сравнение эпюр усилий в раме без колонны и в раме с колонной

Убедимся в том, что и расчетные усилия, действующие в двух расчетных схемах являются одинаковыми:

Моменты, поперечные и продольные силы в раме без колонны



Моменты, поперечные и продольные силы в раме с колонной



Моделирование времени приложения нагрузки

Начнем с рекомендаций справочника Коренева и Рабиновича (слайд №21), согласно которой время отказа можно принимать равным $t_{отк} = 0,001$ сек, при отсутствии информации о длительности прикладываемой нагрузки.

Создадим два файла:

1-1.thi

со следующим содержимым: Служебный символ

0 1 #

0

1

Шаг интегрирования

От 0 до 1 по линейному закону будет изменяться приложенная нагрузка от прогрессирующего обрушения, а также реакции от удаленной колонны

Второй файл 1-2-0001.thi

Со следующим содержимым:

0 0.001 #

0

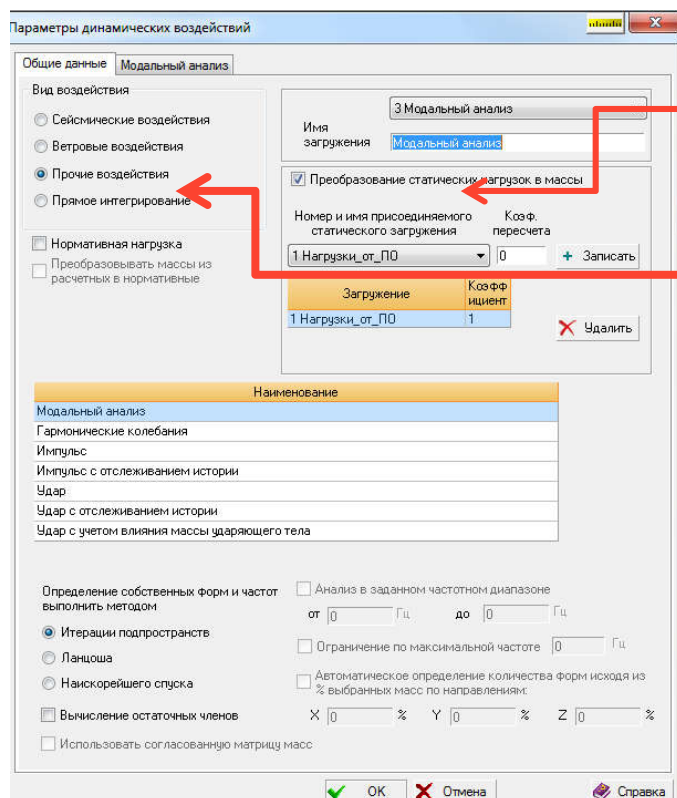
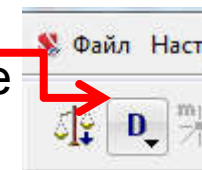
1

Данные два файла разместим в рабочей папке SCAD.

Второй файл моделирует иницирующее воздействие, в течение 1/1000 секунды иницирующее воздействие достигнет значения от 0 до 1.

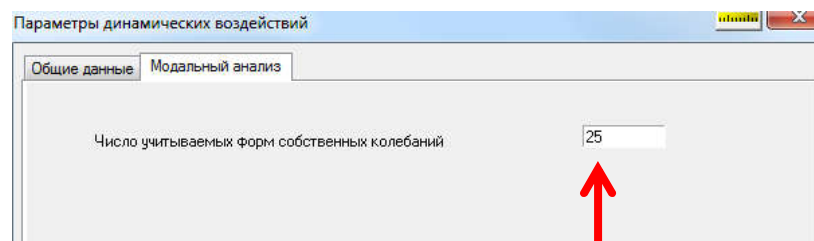
Оценка собственных частот рамы с учетом удаленного элемента

В расчетной схема с удаленным элементом создается новое динамическое загрузке, в прочих воздействиях выбирается модальный анализ.



Преобразовать в массы нагрузки от прогрессирующего обрушения.

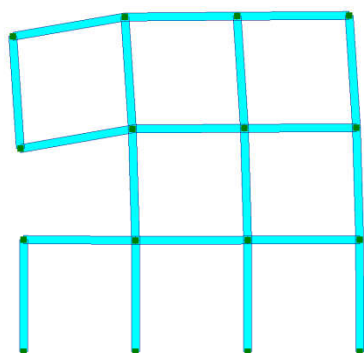
Прочие воздействия.



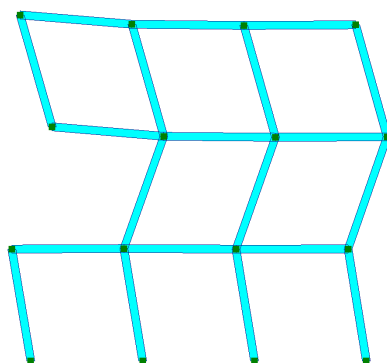
На следующей вкладке указывается число форм колебаний.

Результаты модельного анализа рамы без КОЛОННЫ

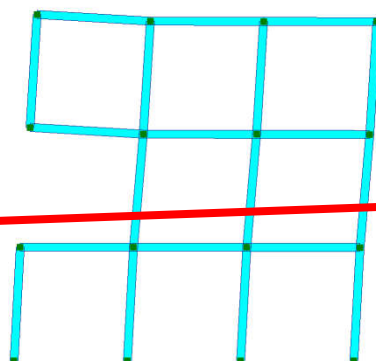
Деформированная схема
рамы с учетом удаления
колонны при нагружении
статической нагрузкой



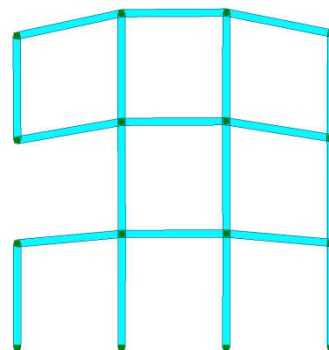
Форма 4,
период 0,37 с



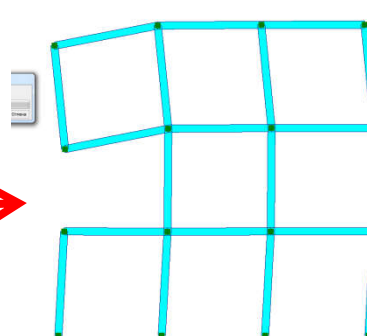
Форма 1,
период 1,93 с



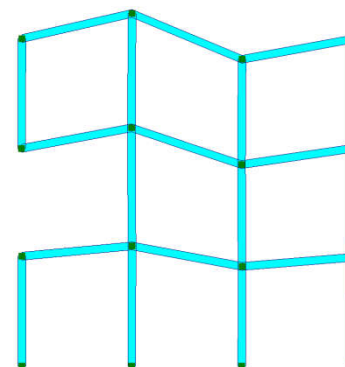
Форма 5,
период 0,15 с



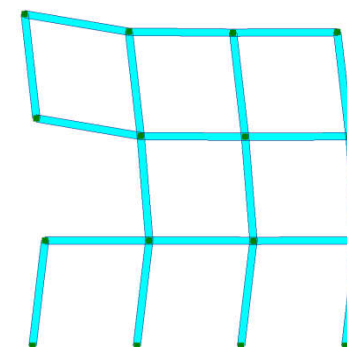
Форма 2,
период 0,79 с



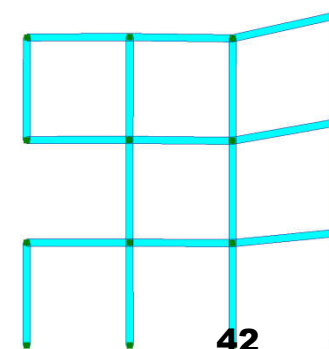
Форма 6,
период 0,14 с



Форма 3,
период 0,51 с



Форма 7,
период 0,1 с



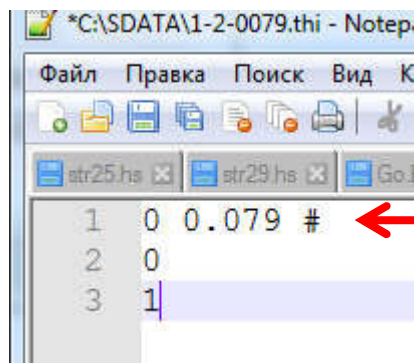
Файл с функцией воздействия по американским нормам

Анализируя данные, представленные на предыдущем слайде, заметим, что именно вторая форма колебаний в наибольшей степени соответствует статическому прогибу рамы при исключении из нее исследуемой колонны.

Вновь подготовим исходные данные в виде файла для расчета, примем 1/10 от периода колебаний по второй форме колебаний:

$$t_{отк} = 0.79 / 10 = 0.079 \text{ с}$$

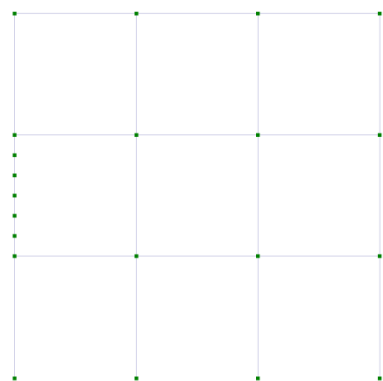
Тогда в файле с исходными данными, характеризующими расчет по Американским нормам данные примут вид:



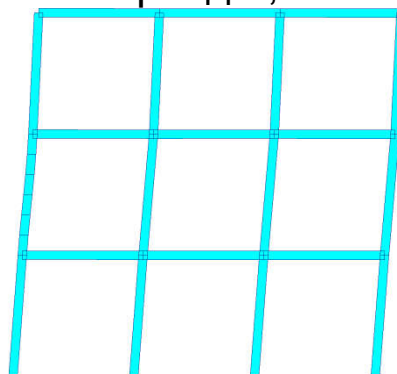
По собственной частоте удаляемого элемента (подход 1)

Для определения собственных частот удаляемого элемента в расчетной схеме произведем его разбиение в схеме с колонной на 6-ть отдельных стержней.

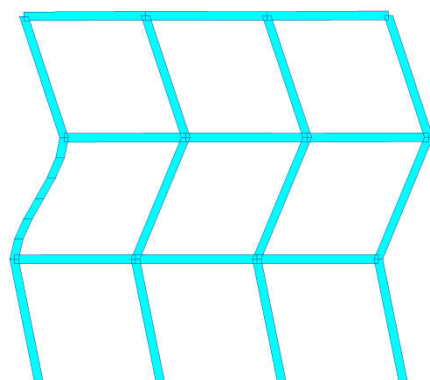
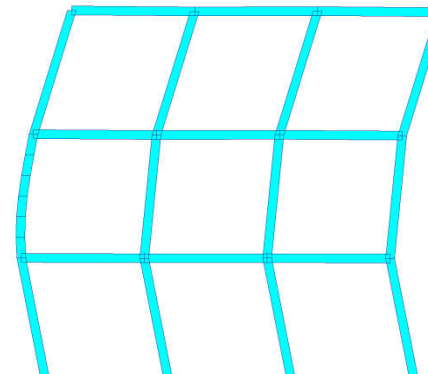
Вид МКЭ модели рамы представлен ниже.



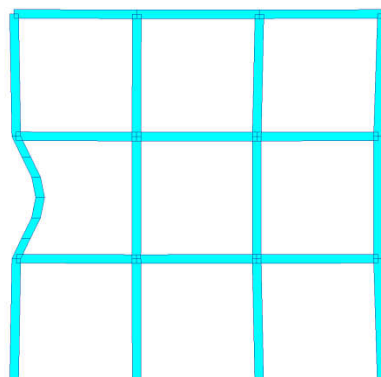
Форма 1,
период 0,27 с



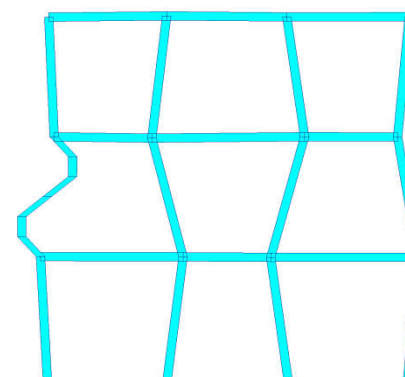
Форма 2, период
0,089 с



Форма 3, период
0,054 с



Форма 9, период 0,016 с



Форма 23, период 0,056 с

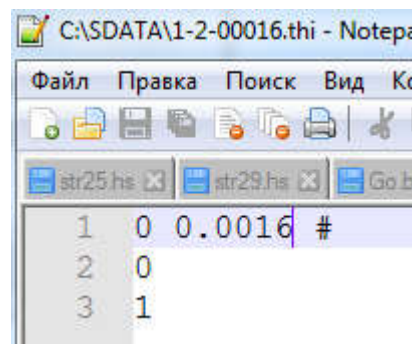
Файл с функцией воздействия по Методу №1

Анализируя данные, представленные на предыдущем слайде, заметим, что именно девятая форма в наибольшей степени характеризует уединенную работу рассматриваемой колонны.

Вновь подготовим исходные данные в виде файла для расчета, примем 1/10 от периода колебаний по девятой форме колебаний:

$$t_{отк} = 0.016 / 10 = 0.0016 \text{ с}$$

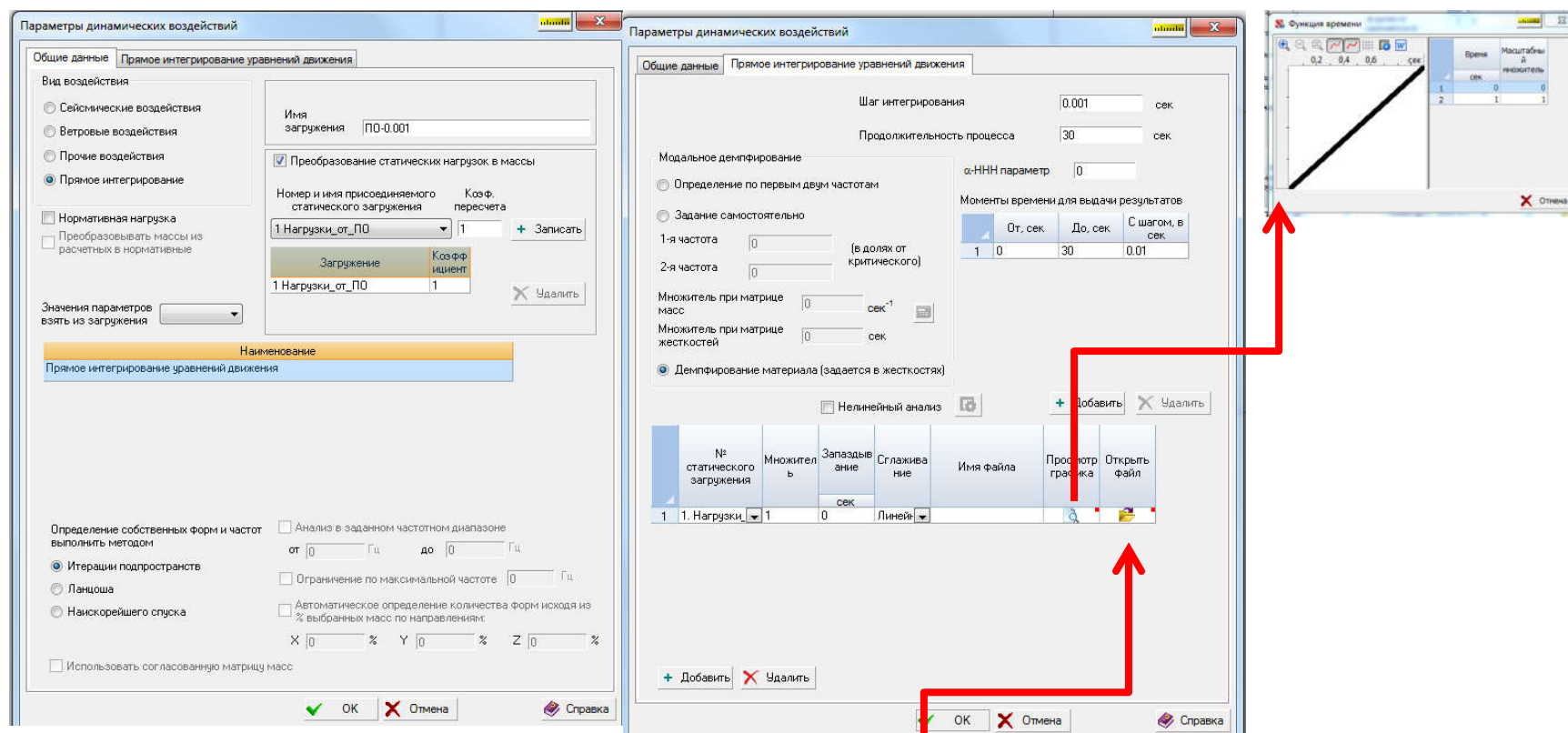
Тогда в файле с исходными данными, характеризующими расчет по Методу 1 данные примут вид:



Задаем параметры прямого динамического расчета

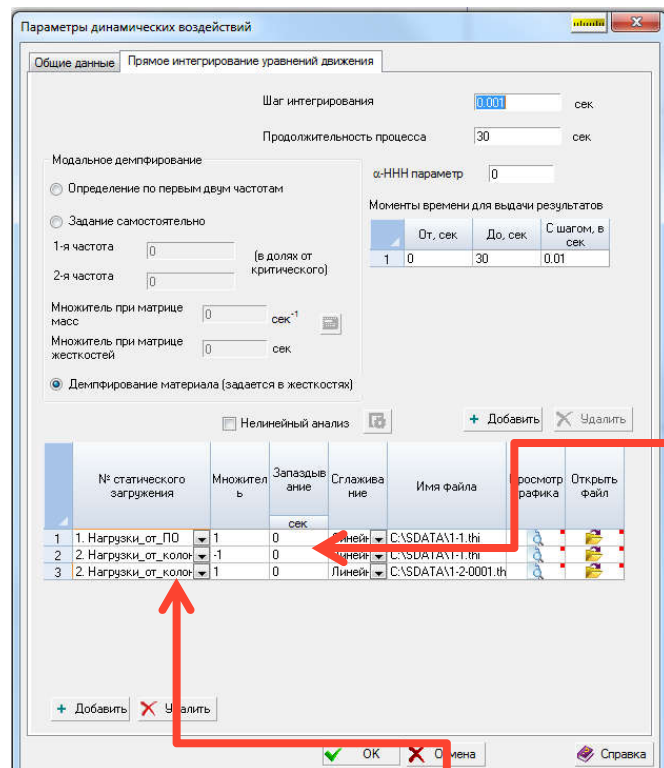
Возвращаясь в расчетную схему рамы без колонны задаем параметры демпфирования 0,02.

Заходим в загрузки и создаем новое динамическое нагружение

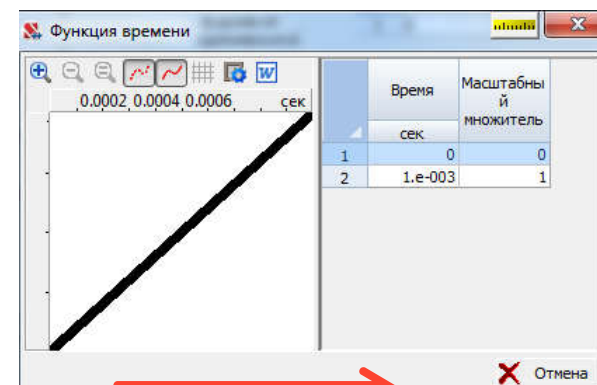


Выбираем файл 1-1.thi

Задание данных динамического расчета (продолжение)



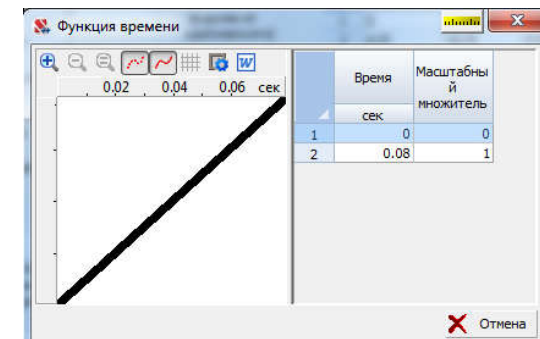
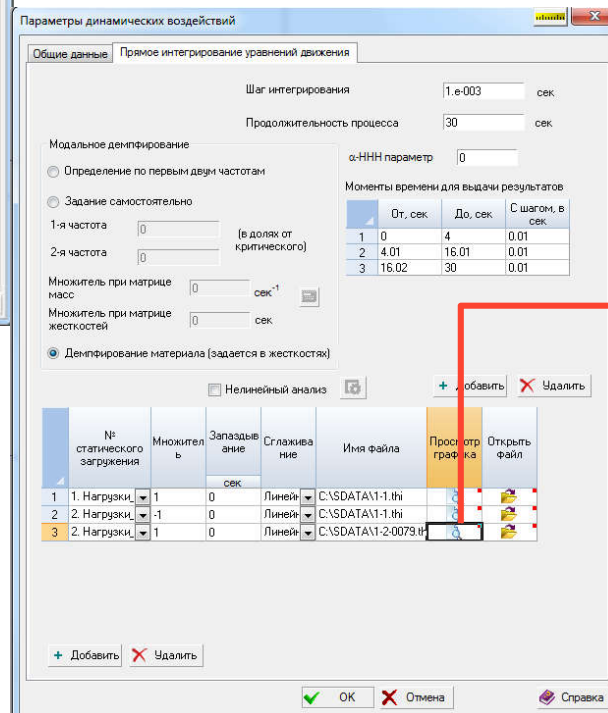
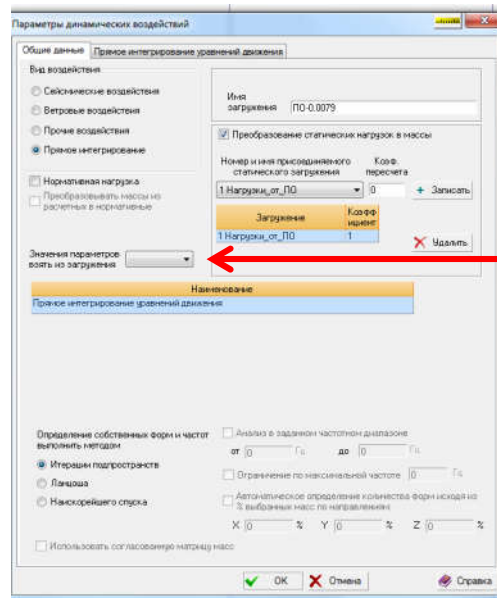
Нагрузка от колонны с коэффициентом -1 и тем же графиком от 0 до 1, что и для нагрузки от загрузки «Прогрессирующее обрушение»



Для этого нагружения нагрузка от колонны берется с коэффициентом +1, но график имеет вид ударного воздействия, то есть время 0,001 сек

Создаем еще два динамических нагружения

Создание двух других динамических нагружений производим на основе только что созданного, путем указания пункта: значения параметров взять из нагружения



На следующей вкладке меняем только график приложения нагрузки

Создание комбинации загружений

Создание данных комбинаций производится путем задание 1 коэффициентов и записи новых комбинаций. Окно РСУ имеет вид:

The image shows two overlapping software windows from a structural analysis program.

Left Window: Комбинации загружений (Load Combinations)

- Checkboxes: ☐ Учесть коэффициент надежности, ☐ Учесть долю длительности
- Buttons: Запись комбинации, Удаление комбинации, Новая комбинация, Загрузить из файла, Сохранить в файл, Отчет
- Table: Загружения/Комбинации

	Загружения/Комбинации	Коэффициент
1	Нагрузки_от_ПО	0
2	Нагрузки_от_колонны	0
3	Модальный анализ	0
4	ПО-0.001	0
5	ПО-0.0079	0
6	ПО-0.0016	1
7	L1-L2	0
8	квазистатика	0
9	0.001	0
10	0.0079	0

- Table: Комбинации загружений

	Комбинации загружений	Название
1	L1-L2	
2	L1+L2	квазистатика
3	L4	0.001
4	L5	0.0079
5	L6	0.0016

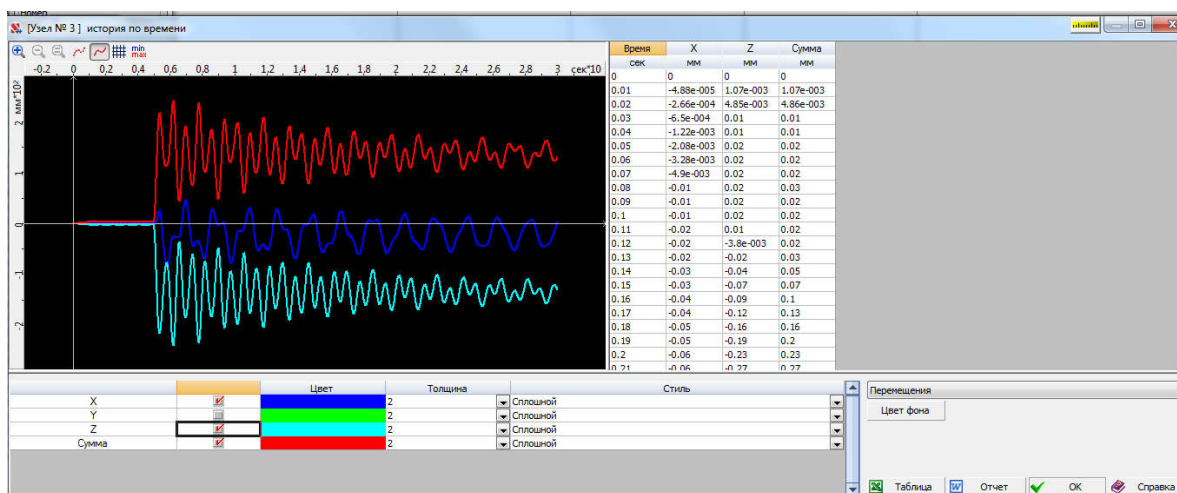
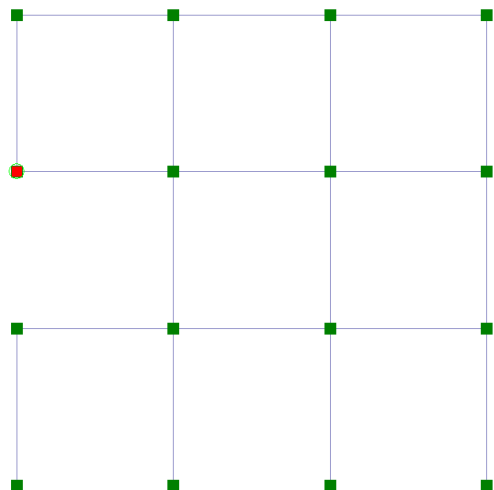
- Buttons: Удаление данных, ☒ Не учитывать комбинации в РСУ, OK, Отмена, Справка

Right Window: Расчетные сочетания усилий и перемещений (Design Combinations of Efforts and Displacements)

- Buttons: Деактивировать загрузку, Дерево РСУ, Удаление РСУ, Отчет
- Text: Загружения не могут входить в сочетания без загружений
- Text: Шаг ориентации площадок при анализе пластин: 15 град
- Section: Параметры
 - Список элементов
 - Унификация
 - Группы
- Section: Связи загружений
 - Объединение
 - Сопутствие
 - Взаимоисключение
 - Краны
- Section: Типы сооружений (при учете сейсмики)
 - ☒ Гражданские и промышленные
 - ☐ Транспортные
- Buttons: OK, Отмена, Справка

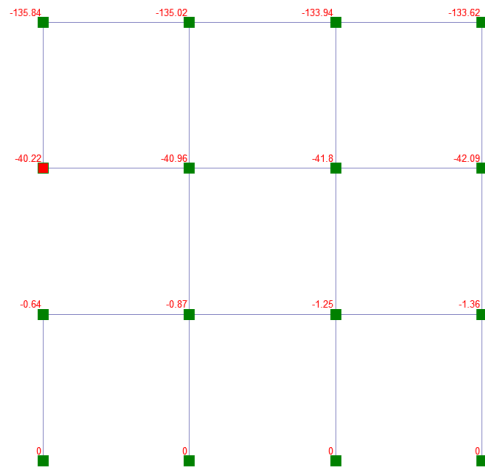
Анализ полученных результатов

После выполнения расчета возможно посмотреть как, например, изменяется перемещение некоего узла расчетной схемы, выберем узел верхней части удаляемой колонны в качестве исследуемого

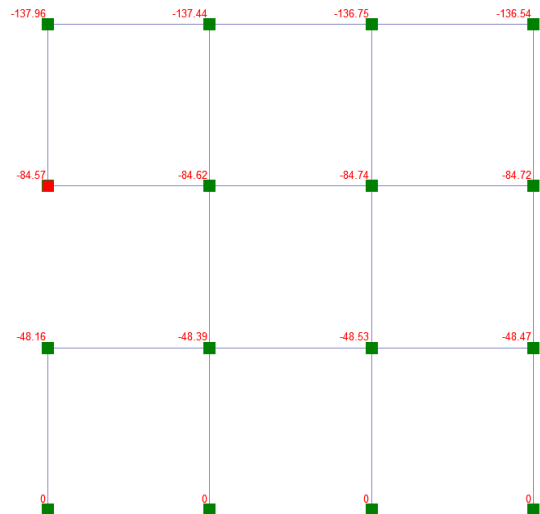


Анализ полученных результатов

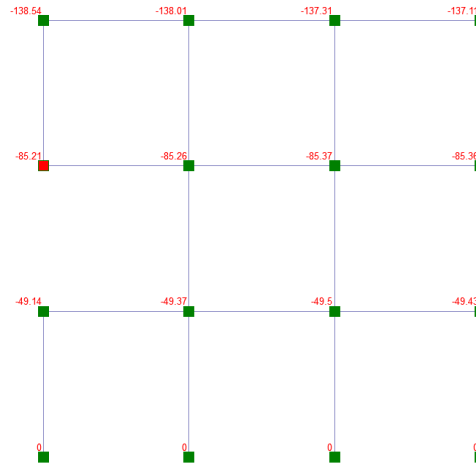
Квазистатика дает в точке 40,22 мм



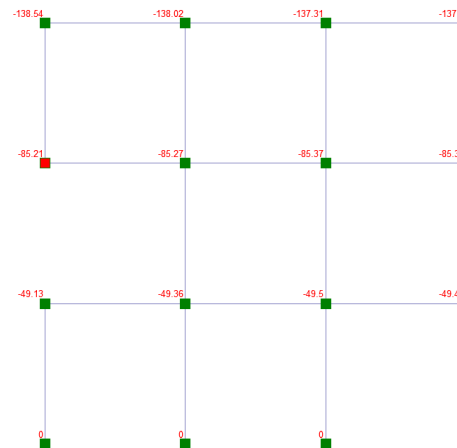
Расчет по американским нормам
дает в точке 84,57 мм



По методу 3 расчет дает в точке
85,21 мм



По методу 2 расчет дает в точке
85,21 мм





Литература

1. Карпиловский В.С., Крискунов Э.З., Перельмутер А.В., Перельмутер М.А., Трофимчук А.Н. SCAD для пользователя. – Киев.: ВВП «Компас», 2000. – 332 с.
2. Семенов А.,А., Габитов А.И. Проектно-вычислительный комплекс SCAD в учебном процессе. Часть 1. Статический расчет : Учебное пособие. – М.: Издательство АСВ, 2005. 152 с.
3. Шапошников Н.Н., Кристалинский Р.Е., Дарков А.В. Строительная механика. М.2012. - 703 с. Доступ из ЭБС «Лань».
4. Перельмутер А.В. Расчетные модели сооружений и возможность их анализа [Электронный ресурс]/ Перельмутер А.В., Сливкер В.И.— Электрон. текстовые данные.— М.: ДМК Пресс, 2009.— 456 с.— Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/7880>.— ЭБС «IPRbooks».
5. SCAD Office. Вычислительный комплекс SCAD.: [учеб.пособие по направлению 653500 «Стр-во» /В.С. Карпиловский и др.] М.: Изд-во Ассоц. Строит. Вузов, 2008