Итерационные КЭ для моделирования платформенных и контактных стыков панельных зданий в ПК Лира-САПР 2020

Водопьянов Роман Юрьевич

Губченко Виктор Евгеньевич

сопровождение ПК ЛИРА-САПР

www.liraland.ru | www.rflira.ru | +7 (495) 106-16-06

Москва, 2020

Как работает нелинейный КЭ стыка Стр. 3

Тестовые примеры в статике и динамике Стр. 12

Проверка несущей способности горизонтального стыка Стр. 29

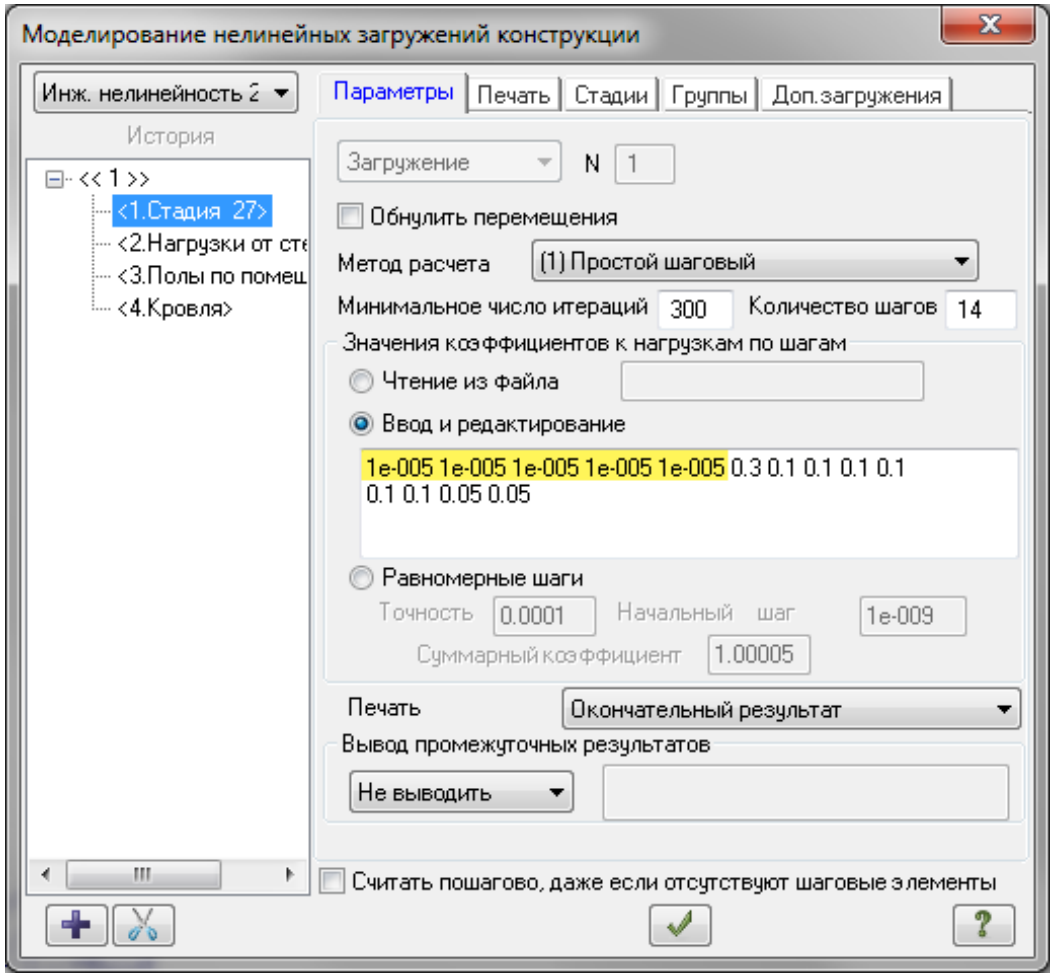
Примеры расчета на реальных объектах Стр. 36

Москва, 2020

Как работает нелинейный КЭ стыка

Москва, 2020

Как работал шаговый КЭ стыка в версиях 2017-2019



Реализация нелинейного расчета КЭ стыка в шаговой постановке содержит «подводные камни», аналогичные реализации односторонних связей в шаговой постановке – очень много зависит от величины шага нелинейного расчета, особенно в момент изменения знака напряжения (что может быть связано не только с изменением направления нагрузки, а, например, с изменением расчетной схемы в процессе возведения) .

Например: Берем 1-ю стадию 1-й шаг, никаких усилий еще нет и поэтому все элементы работают как линейные – с начальным модулем упругости. При вычислении усилий в конце этого шага полученные перемещения умножаются на большие (начальные) жесткости и получаются большие усилия (в том числе и растягивающие). Элементу стыка, который растянут, назначается очень маленькая жесткость (1е-5 от начальной). Берем следующий шаг, на котором этот растянутый КЭ стыка, например, теперь будет сжат. При вычислении усилий в конце этого шага полученные перемещения от этого шага умножаются на очень маленькие жесткости и получаются очень маленькие усилия сжатия. Эти маленькие усилия сжатия прибавляются к большим усилиям растяжения из 1-го шага и практически не меняют их. Поэтому усилия на 1-м шаге в элементе стыка, который сразу стал растянутым, очень слабо меняются на последующих шагах, в том числе, и когда он стал пригружаться сверху нагрузками от других стадий (монтируемых этажей).

Чтобы нейтрализовать этот эффект, в начале каждой стадии можно добавить несколько микрошагов, с величиной шага, например, равной «1е-5», чтобы на микрошагах поймать растянутые элементы стыка, при этом получить в них микроусилия, которые на полноценных шагах перекроются сжимающими нагрузками.

Полный доклад:
https://rflira.ru/files/events/2019/materials/LIRA-SAPR_Panel_100+2019.pdf

Как теперь работает шаговый КЭ стыка в версии 2020

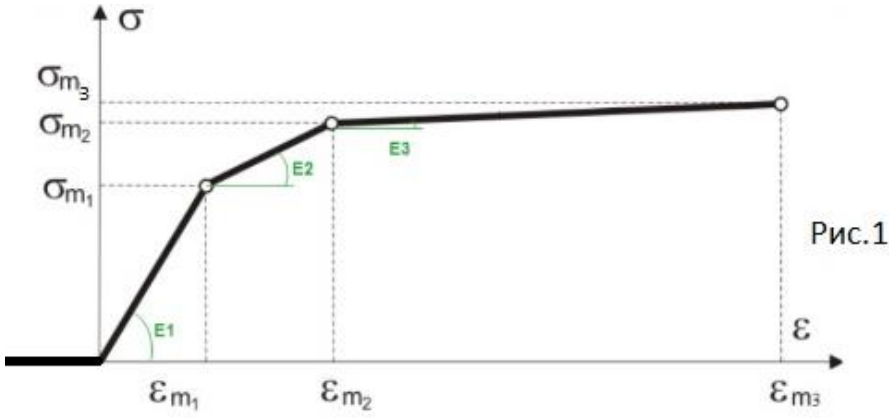
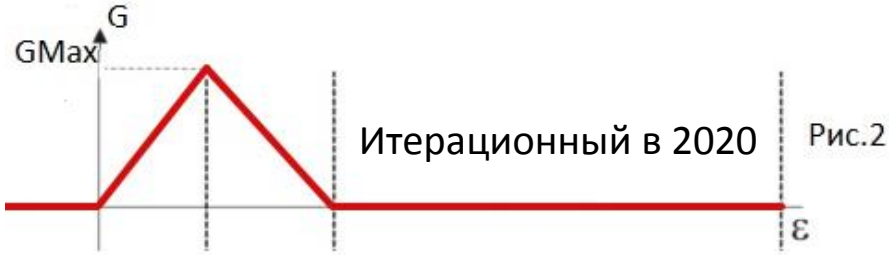
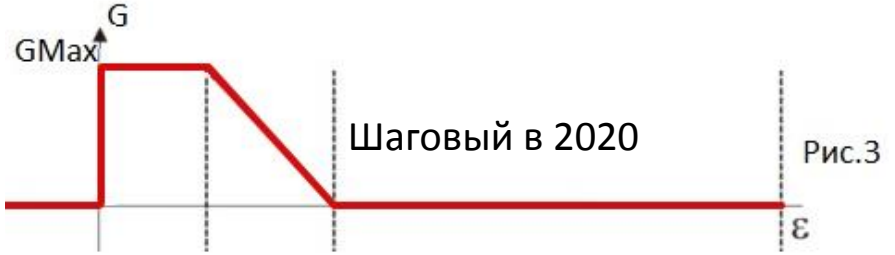


Рис.1



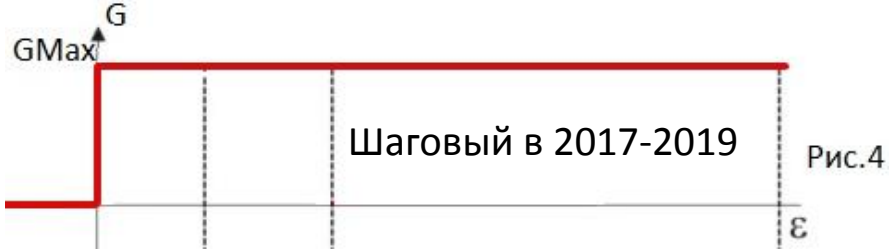
Итерационный в 2020

Рис.2



Шаговый в 2020

Рис.3



Шаговый в 2017-2019

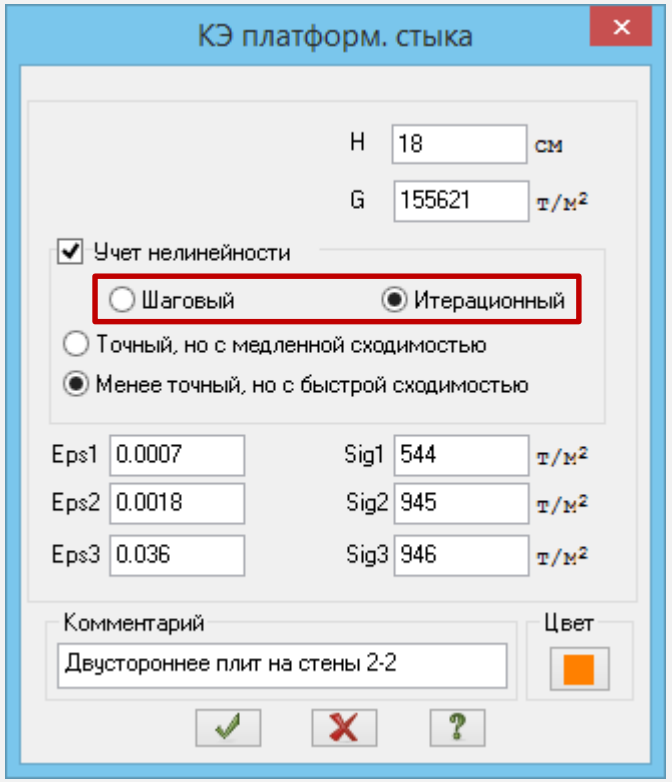
Рис.4

В диалоге задания нелинейных жесткостей для элементов платформенного стыка теперь есть выбор «шаговый» или «итерационный».

На рис. 1 показана диаграмма зависимости напряжений сжатия в стыке от деформаций сжатия. Подробнее об этом можно почитать в статье https://rflira.ru/services/publications/articles/569/ или Базе знаний – https://rflira.ru/kb/96/984/. Для каждого из участков диаграммы вычислена своя жесткость. Податливости для стыка приняты в соответствии с:

- Пособие по проектированию жилых зданий Вып. 3 Конструкции жилых зданий (к СНиП 2.08.01-85). М. 1989 г.
- СП 335.1325800.2017 «Крупнопанельные конструктивные системы. Правила проектирования».

На рис. 4 показана работа КЭ стыка на сдвиг в зависимости от деформаций сжатия в версиях 2017-2019: сдвиговая жесткость стыка принималась постоянной величины для сжатых КЭ стыка и близкой к нулю для растянутых.



В версии 2020 уточнили работу шагового КЭ стыка, теперь сдвиговая жесткость максимальная на участке стыка с вертикальными напряжениями от ноля до σ_{m1} (точка изменения жесткости стыка, в зависимости от напряжений сжатия), а затем уменьшается до нуля к точке σ_{m2} (точка предельного напряжения, выше которого в литературе и нормах не регламентирован расчет податливости стыка). Т.е. на участках стыка достигших уровня сжатия σ_{m2} и выше сдвиговая жесткость обнулена.

Изначально сделать КЭ стыка итерационным мешал разрыв функции в нулевой точке (переход от сжатия к растяжению). Получалось, что если наблюдаем напряжение сжатия равное 1 кг/м2, то жесткость сдвига максимальная, а если растяжение такой же величины, то уже нулевая. В версии 2020 для итерационного варианта решения КЭ стыка принято плавное изменение сдвиговой жесткости от нуля к максимуму с нарастанием уровня напряжений сжатия – см. рис. 2.

Дальше покажем на основании чего мы пришли к такому решению.

Как теперь работает шаговый КЭ стыка в версии 2020

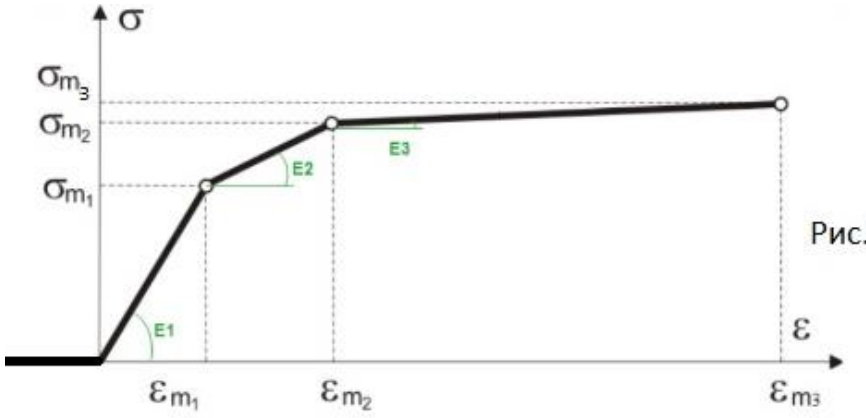


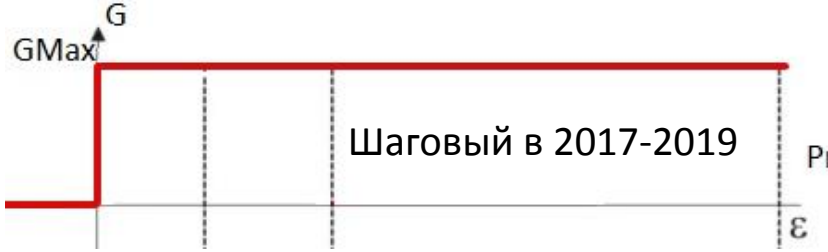
Рис.1

Итерационный в 2020

Рис.2

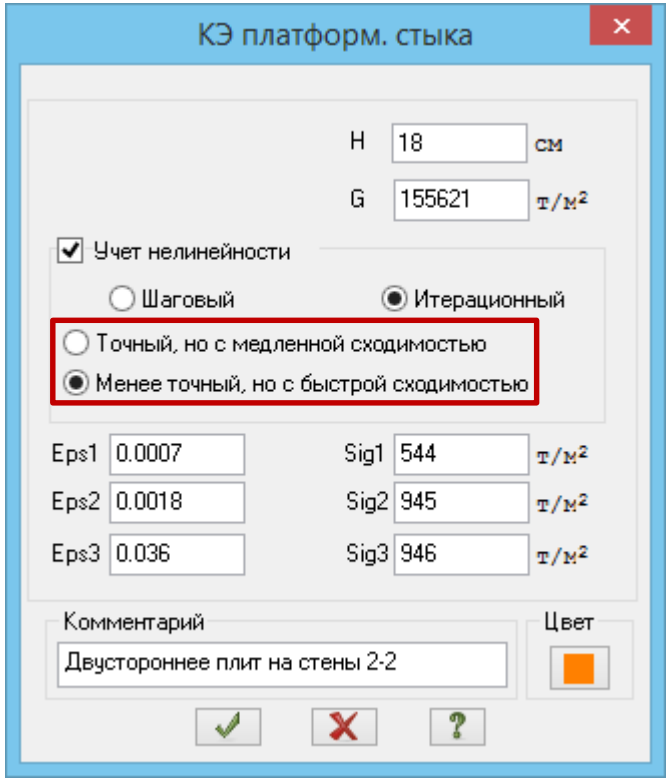
Шаговый в 2020

Рис.3



Шаговый в 2017-2019

Рис.4



В диалоге задания нелинейных жесткостей для элементов платформенного стыка теперь есть выбор «шаговый» или «итерационный», и если выбран «итерационный», то можно выбрать «точный, но с медленной сходимостью» или «менее точный, но с быстрой сходимостью».

Казалось бы зачем вообще давать такой выбор. Надо просто реализовать только «точный, но с медленной сходимостью». К сожалению, «испытания» показали что общий итерационный расчет для задач с такими элементами очень медленно сходится (нужно выполнить много итераций). Поскольку элементы стыка предполагается применять в больших задачах, то это может потребовать очень большого времени выполнения. В то же время «менее точный, но с быстрой сходимостью» может оказаться вполне достаточным.

Дальше мы покажем погрешность при выборе «менее точного» в сравнении с «точным».

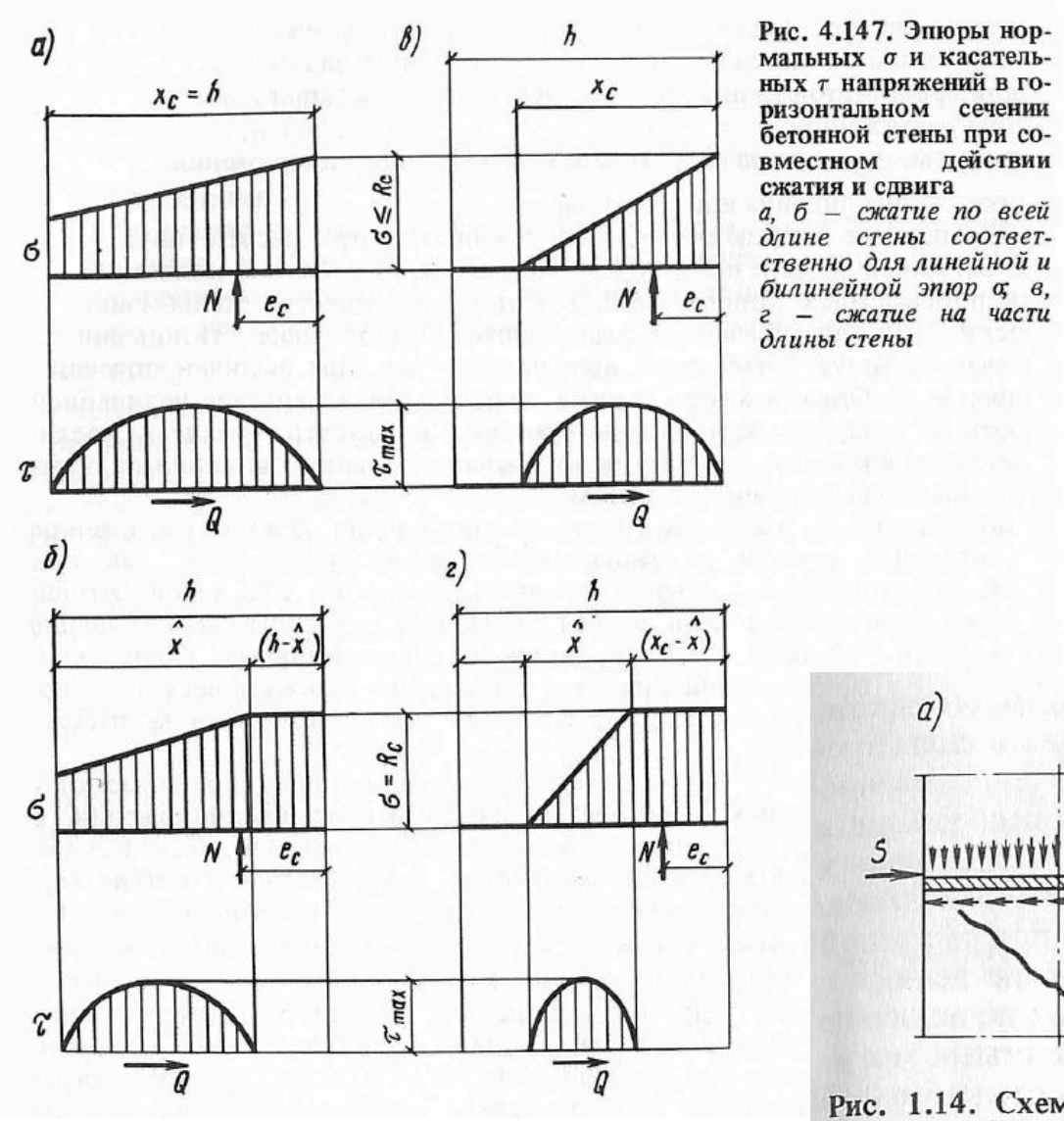


Рис. 4.147. Эпюры нормальных σ и касательных τ напряжений в горизонтальном сечении бетонной стены при совместном действии сжатия и сдвига

а, б – сжатие по всей длине стены соответственно для линейной и билинейной эпюр σ; в, г – сжатие на части длины стены

Своё вдохновение мы черпали из замечательной книги:

Железобетонные стены сейсмостойких зданий. Исследования и основы проектирования. Под редакцией Г. Н. Ашкинадзе и М. Е. Соколова. Совместное издание Греция-СССР. – Москва: Стройиздат, 1988 г. — 504 стр.

В ней на основе выполненных в СССР и других странах экспериментов обобщен опыт проектирования и исследования несущих монолитных и панельных железобетонных стен при землетрясениях. Приведены рекомендации по проектированию железо-бетонных стен сейсмостойких зданий. Рекомендовано к изданию отделом сейсмостойких зданий ЦНИИСК им. Кучеренко.

Почему так важно получить корректную (близкую к натурным испытаниям) работу стыка на сдвиг – в случае выключения части стыка на восприятие сдвиговых нагрузок (сейсмических, ветровых или прочих), уменьшается общая несущая способность стыка на сдвиг, что нужно учитывать. И при необходимости установки дополнительных сдвиговых связей (сварные связи по закладным, бетонные армированные шпонки и т.п.) необходимо получить корректные нагрузки на эти связи.

Дальше сравним работу наших новых итерационных КЭ стыка с предположениями описанными в этой книге.

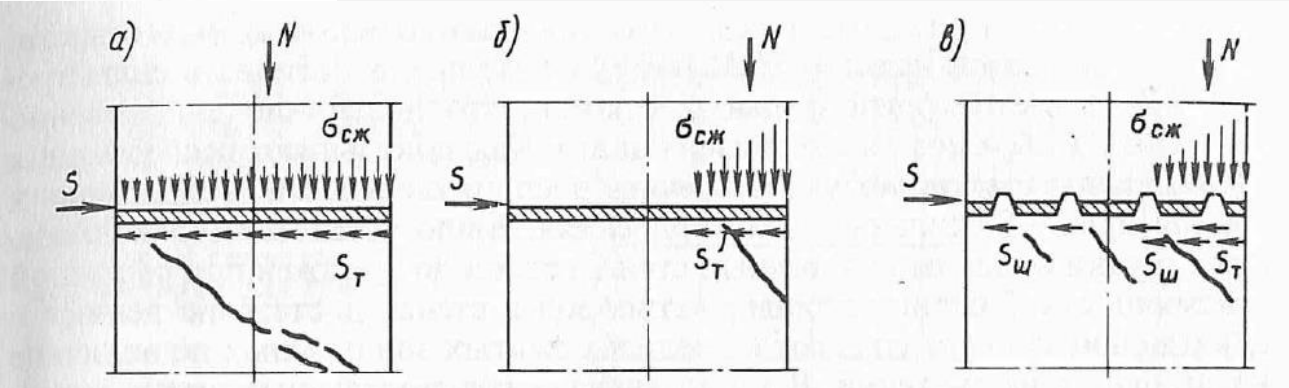


Рис. 1.14. Схемы работы горизонтальных стыков и примыкающих к ним стен (по книге С.В. Полякова "Сейсмостойкие конструкции зданий". М., 1969)

а – при гладком стыке и малых эксцентриситетах нормальной силы; б – то же, при эксцентриситетах $e_0 > 0{,}45y_b$; в – при наличии связей сдвига

Построение диаграммы работы на сжатие стыка и предел несущей способности

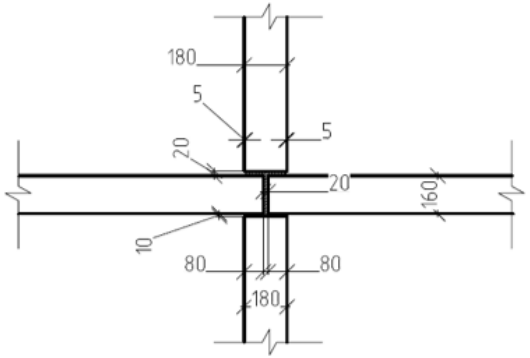


Рис. 11.3. Схема платформенного стыка при двухстороннем опирании плит перекрытий

Вариант 1: класс бетона стеновых панелей В25, плиты перекрытия В20, раствор марки М100.

Расчет ведем на 1м.п. стыка.

Несущая способность горизонтального стыка при сжатии при продолжительном действии нагрузок:

$$N_{j,long} = 5.462 \cdot 180 \cdot 1000 = 983160Н = \mathbf{102.26тс};$$

$R_c = 9.98 \cdot 0.841 \cdot 0.651 = 5.462$МПа; t=180мм – толщина стеновой панели; dj=1000мм – расчетная ширина простенка в зоне стыка.

Коэффициент, учитывающий влияние горизонтальных растворных швов:

$$\eta_m = 1 - \frac{\left(2 - \frac{t_m}{b_m}\right) * \frac{t_m}{b_m}}{1 + \frac{2R_m}{B_w}} = 1 - \frac{\left(2 - \frac{28}{180}\right) * \frac{28}{180}}{1 + \frac{2 \cdot 10}{25}} = 0.841,$$

где t_m=1.4*$t_{m,nom}$=1.4*20=28мм; b_m=t=180мм – для платформенного стыка с двухсторонним опиранием перекрытий; R_m=10МПа; B_w=25МПа.

Коэффициент, учитывающий конструктивный тип стыка, неравномерность распределения сжимающей нагрузки между опорными площадками стыка и эксцентриситет продольной силы относительно центра стыка:

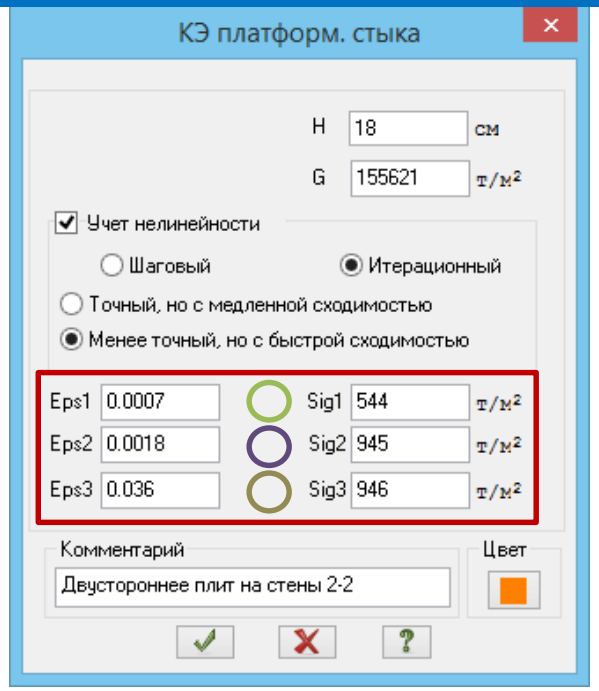
$$\eta_j = (b_{pl} - \delta_{pl}) \cdot \gamma_{pl} \cdot \eta_{pl}/t = (150 - 14) \cdot 0.9 \cdot 0.957/180 = 0.651,$$

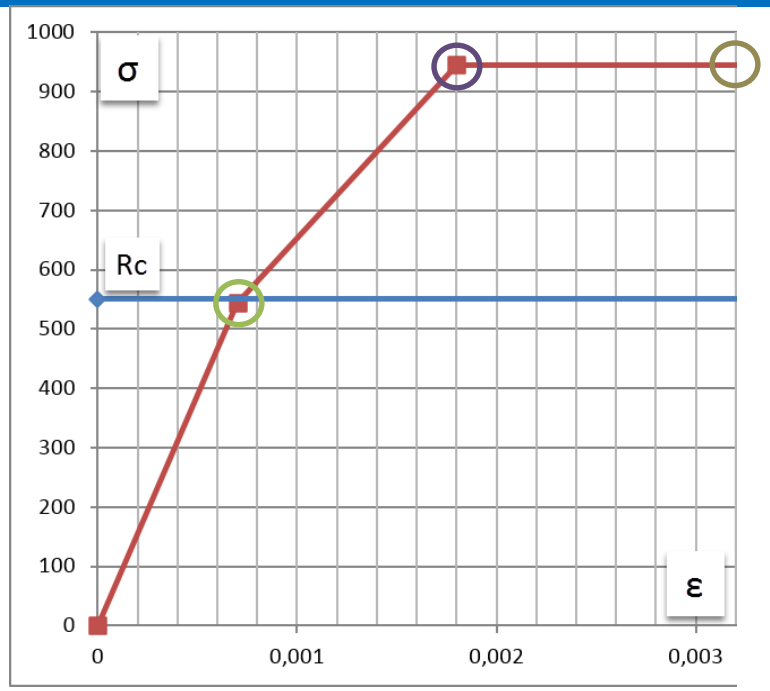
b_{pl}=180-2*5-20=150мм – суммарный размер по толщине стены платформенных площадок, через которые в стыке передается сжимающая нагрузка;

δ_{pl}=1.4δ_p=1.4*10=14мм – возможное суммарное смещение в платформенном стыке плит перекрытий относительно их проектного положения;

γ_{pl}=0.9 – коэффициент, учитывающий неравномерность загружения платформенных площадок;

η_{pl}=1-(1-R_{bp}/R_{bw})^2=1-(1-11.5/14.5)^2 =0.957.





При задании диаграммы работы стыка на сжатие важно понимать – это диаграмма жесткостей в зависимости от уровня напряжений, здесь ни как не учтена несущая способность стыка. Более того, податливость платформенного стыка (а от неё жесткость стыка) считается от марки раствора и класса бетона плиты перекрытия. А несущая способность стыка – это, прежде всего, напрямую класс бетона стеновой панели, а уже косвенно влияет марка раствора и класс бетона плиты перекрытия. Поэтому, может иногда получиться, что на диаграмме работы стыка несущая способность Nj (приведенные напряжения Rc к метру погонному стыка) находится даже ниже, чем первая пара σ-ε, описывающая жесткость стыка.

В формировании диаграммы работы стыка мы опирались на формулы определения податливостей растворных швов описанных в «Пособии по проектированию жилых зданий Вып. 3 Конструкции жилых зданий (к СНиП 2.08.01-85). М. 1989 г.» и СП 335.1325800.2017 «Крупнопанельные конструктивные системы. Правила проектирования». Что было описано в статьях в журнале Жилищное строительство. На основе этих данных мы построили трехлинейную диаграмму, где третий участок (при σ>2$Rm^{2/3}$) находится за пределами известного нам способа вычисления жесткости горизонтального стыка. Соответственно, при достижении такого напряжения в шаговом КЭ стыка жесткость практически обнулялась, и все последующие добавочные нагрузки распределялись на другие части конструкций. Аналогичные результаты теперь даёт и итерационный КЭ стыка.

Построение диаграммы работы на сжатие стыка и предел несущей способности

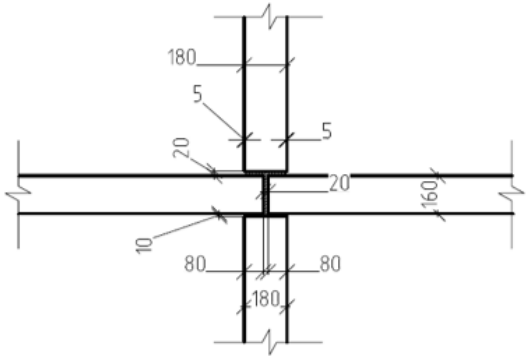


Рис. 11.3. Схема платформенного стыка при двухстороннем опирании плит перекрытий

Вариант 1: класс бетона стеновых панелей B25, плиты перекрытия B20, раствор марки M100.

Расчет ведем на 1м.п. стыка.

Несущая способность горизонтального стыка при сжатии при продолжительном действии нагрузок:

$$N_{j,long} = 5.462 \cdot 180 \cdot 1000 = 983160Н = \mathbf{102.26тс};$$

$R_c = 9.98 \cdot 0.841 \cdot 0.651 = 5.462$МПа; t=180мм – толщина стеновой панели; dj=1000мм – расчетная ширина простенка в зоне стыка.

Коэффициент, учитывающий влияние горизонтальных растворных швов:

$$\eta_m = 1 - \frac{\left(2 - \frac{t_m}{b_m}\right) * \frac{t_m}{b_m}}{1 + \frac{2R_m}{B_w}} = 1 - \frac{\left(2 - \frac{28}{180}\right) * \frac{28}{180}}{1 + \frac{2 \cdot 10}{25}} = 0.841,$$

где t_m=1.4*$t_{m,nom}$=1.4*20=28мм; b_m=t=180мм – для платформенного стыка с двухсторонним опиранием перекрытий; R_m=10МПа; B_w=25МПа.

Коэффициент, учитывающий конструктивный тип стыка, неравномерность распределения сжимающей нагрузки между опорными площадками стыка и эксцентриситет продольной силы относительно центра стыка:

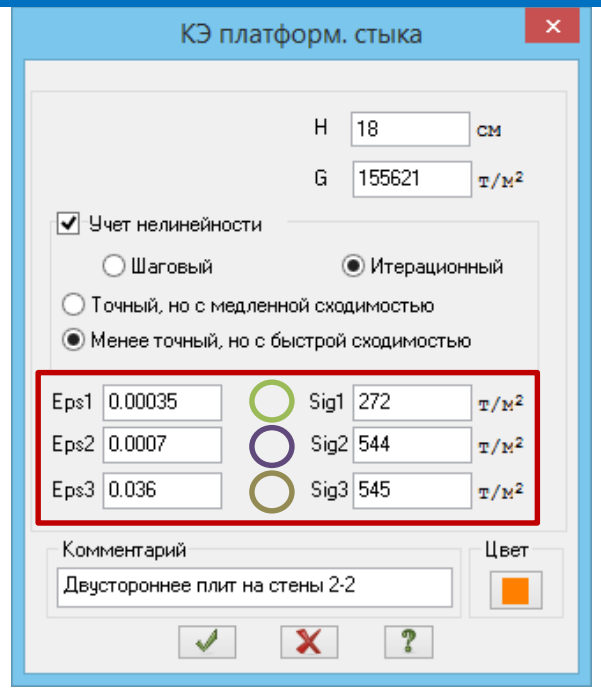
$$\eta_j = (b_{pl} - \delta_{pl}) \cdot \gamma_{pl} \cdot \eta_{pl}/t = (150 - 14) \cdot 0.9 \cdot 0.957/180 = 0.651,$$

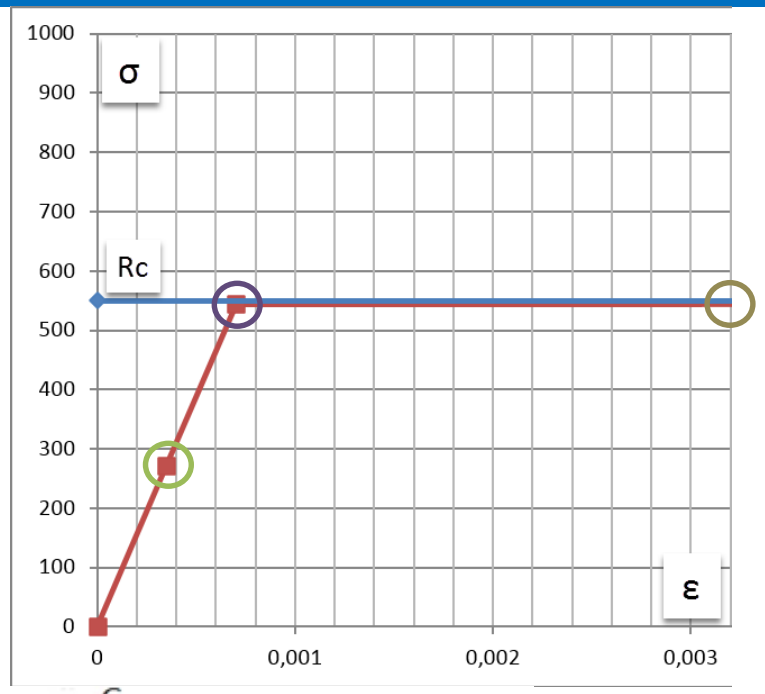
b_{pl}=180-2*5-20=150мм – суммарный размер по толщине стены платформенных площадок, через которые в стыке передается сжимающая нагрузка;

δ_{pl}=1.4δ_p=1.4*10=14мм – возможное суммарное смещение в платформенном стыке плит перекрытий относительно их проектного положения;

γ_{pl}=0.9 – коэффициент, учитывающий неравномерность загружения платформенных площадок;

η_{pl}=1-(1-R_{bp}/R_{bw})^2=1-(1-11.5/14.5)^2 =0.957.

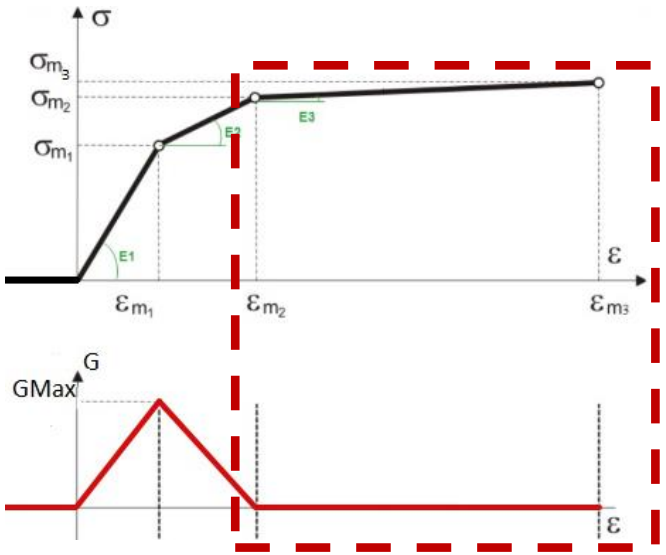




Так же, важно подчеркнуть, что автоматически полученную диаграмму работы в препроцессоре Сапфир можно откорректировать в Визоре (Лира-САПР) путем изменения значения в парах σ-ε. Поэтому пользователь может принимать решение, как именно будет работать нелинейный КЭ стыка. В том числе, например, и преобразовать диаграмму к билинейному виду. Только нужно помнить, что на первую пару σ-ε ориентируется максимальная сдвиговая жесткость, а на вторую обнуление сдвиговой жесткости, как было показано выше.

На рис. 4.147 «Железобетонные стены сейсмостойких зданий... Под редакцией Г. Н. Ашкинадзе и М. Е. Соколова…», мы видим: стык работает по билинейной диаграмме, а предельное напряжение в стыке равно Rc. В данной книге на стр. 418-421 предложен способ оценки несущей способности столба бетонных панелей по разным сечениям с разбиением стеновой панели на отдельные вертикальные полосы. См. детальнее в первоисточнике. В разделе «Проверка несущей способности горизонтального стыка» рассмотрим подобный подход.

Построение диаграммы работы на сжатие стыка и предел несущей способности



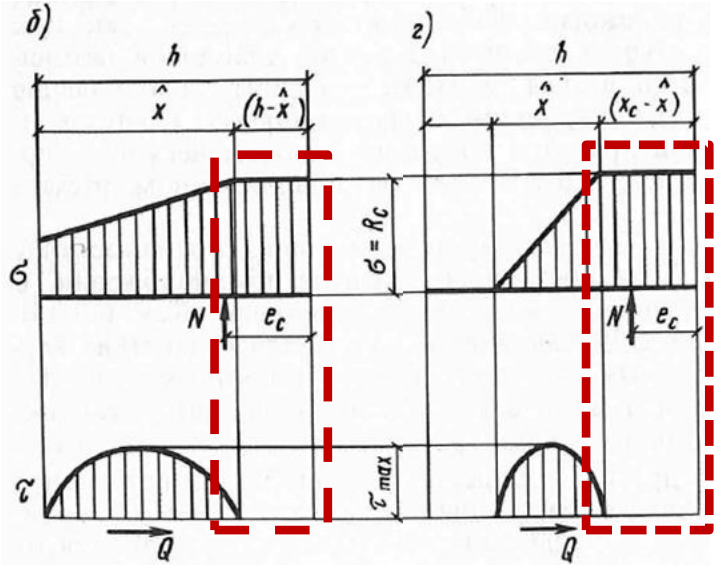
При кратковременном сжатии для раствора прочностью на сжатие 1 МПа и более, при толщине шва 10 – 20 мм коэффициент податливости растворного шва λ_m, мм³/Н, следует определять по формулам:

при $\sigma_m \le 1{,}15 R_m^{2/3}$ $\quad \lambda_m = 1{,}5 \cdot 10^{-3} R_m^{-2/3} t_m$, (А.4)

при $2R_m^{2/3} \ge \sigma_m > 1{,}15 R_m^{2/3}$ $\quad \lambda_m = 5 \cdot 10^{-3} R_m^{-2/3} t_m$, (А.5)

где σ_m – среднее значение сжимающих напряжений в растворном шве, МПа;

R_m – кубиковая прочность раствора, МПа;



Важное дополнение к двум предыдущим слайдам.

В основе существующих нормативных документов лежит **эмпирический** подход по оценке прочности и податливости горизонтальных стыков.

Основной моделью для расчета в соответствии с нормами проектирования является модель вертикального столба. Модуль деформаций столба определяется в зависимости от модуля деформаций стеновой панели и податливости горизонтального стыка.

После определения усилий в столбе выполняется проверка прочности горизонтальных сечений в уровне стыка и середины высоты стеновой панели. Проверка прочности в уровне стыка выполняется для основания/верха стеновой панели на действие вертикальных и горизонтальных нагрузок.

Следует отметить, что формулы по определению прочности и податливости не связаны друг с другом.

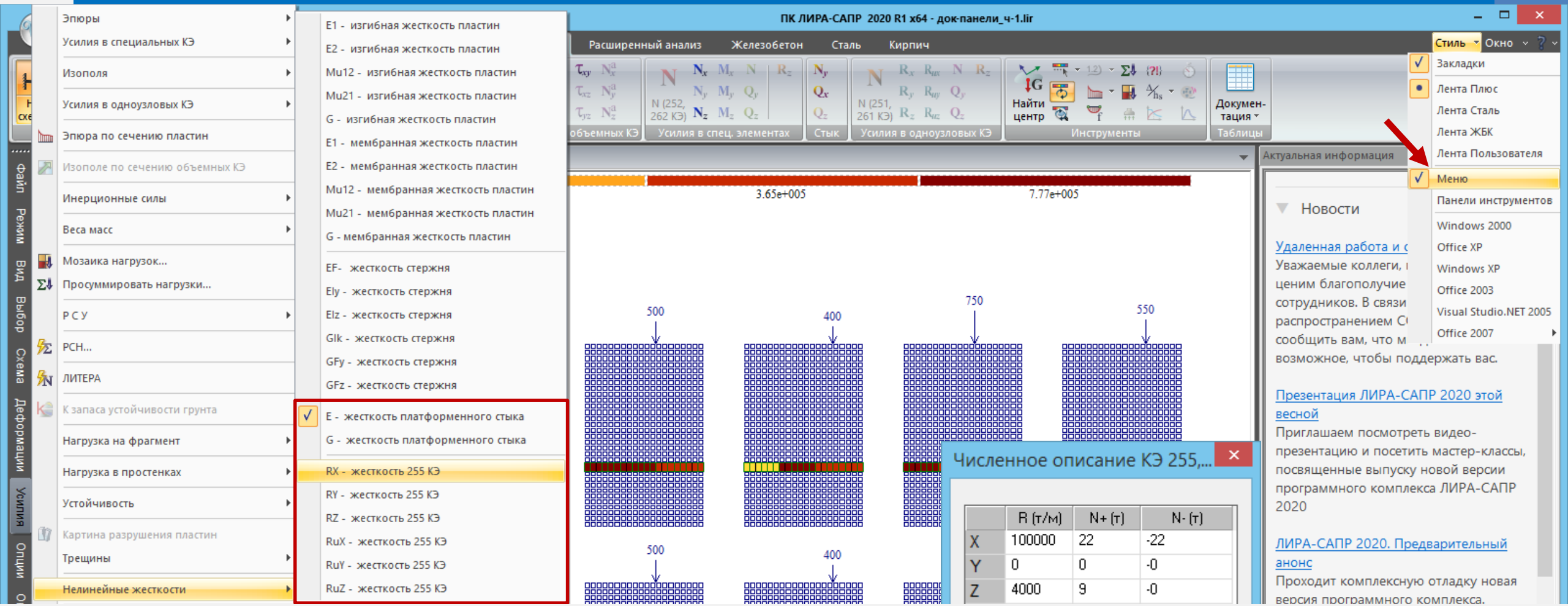
Таким образом, нормы проектирования предлагают **инженерный** подход с разделением в определении жесткости системы и прочностными расчетами.

Конечные элементы горизонтального стыка в ПК ЛИРА-САПР позволяют, в первую очередь, учитывать податливость горизонтального стыка в расчетной модели не прибегая к модели эквивалентного столба. При выполнении физически нелинейного конечноэлементного расчета требуется в автоматическом режиме учитывать как изменение жесткости стыка, так и выполнять оценку его прочности. Таким образом, ориентация на нормы не позволяет получить строгую математическую модель, позволяющую учесть указанные выше особенности работы горизонтального стыка.

Поэтому наша задача, прежде всего, – предоставить гибкий инструмент для решения подобных задач, в котором можно реализовать/описать поведение стыков, полученное, например, на основе натурных или численных экспериментов. Хотелось бы получить отклик наших пользователей, обладающих большим опытом расчета крупнопанельных зданий. Мы готовы совершенствовать инструменты ПК ЛИРА-САПР в направлении расчета крупнопанельных зданий.

Далее мы проведем численный эксперимент с диаграммой построенной по умолчанию, рассматривайте это как проверку мат. аппарата нашей программы.

Остаточные жесткости КЭ стыка и КЭ255 (Инженерная нелинейность 2)



Напомним – есть возможность визуализировать остаточные жесткости нелинейных элементов, которые будут применяться для расчета послестадийных загружений (как статических, так и динамических) при использовании системы «Инженерная нелинейность 2». В версии Лира-САПР 2020 было адаптировано вычисление жесткостей КЭ стыка для их итерационной версии. А так же добавлено вычисление остаточных жесткостей для КЭ255: если элемент в последней монтажной стадии не достиг предела заданной несущей способности, то жесткость для послестадийных загружений будет равна заданной R, а если достиг, то равна нулю (что верно для принятой билинейной диаграммы работы). Таким образом по мозаике этой жесткости легко найти все связи разрушенные в процессе заданной нелинейной истории нагружения (остаточная жесткость будет равна нулю).

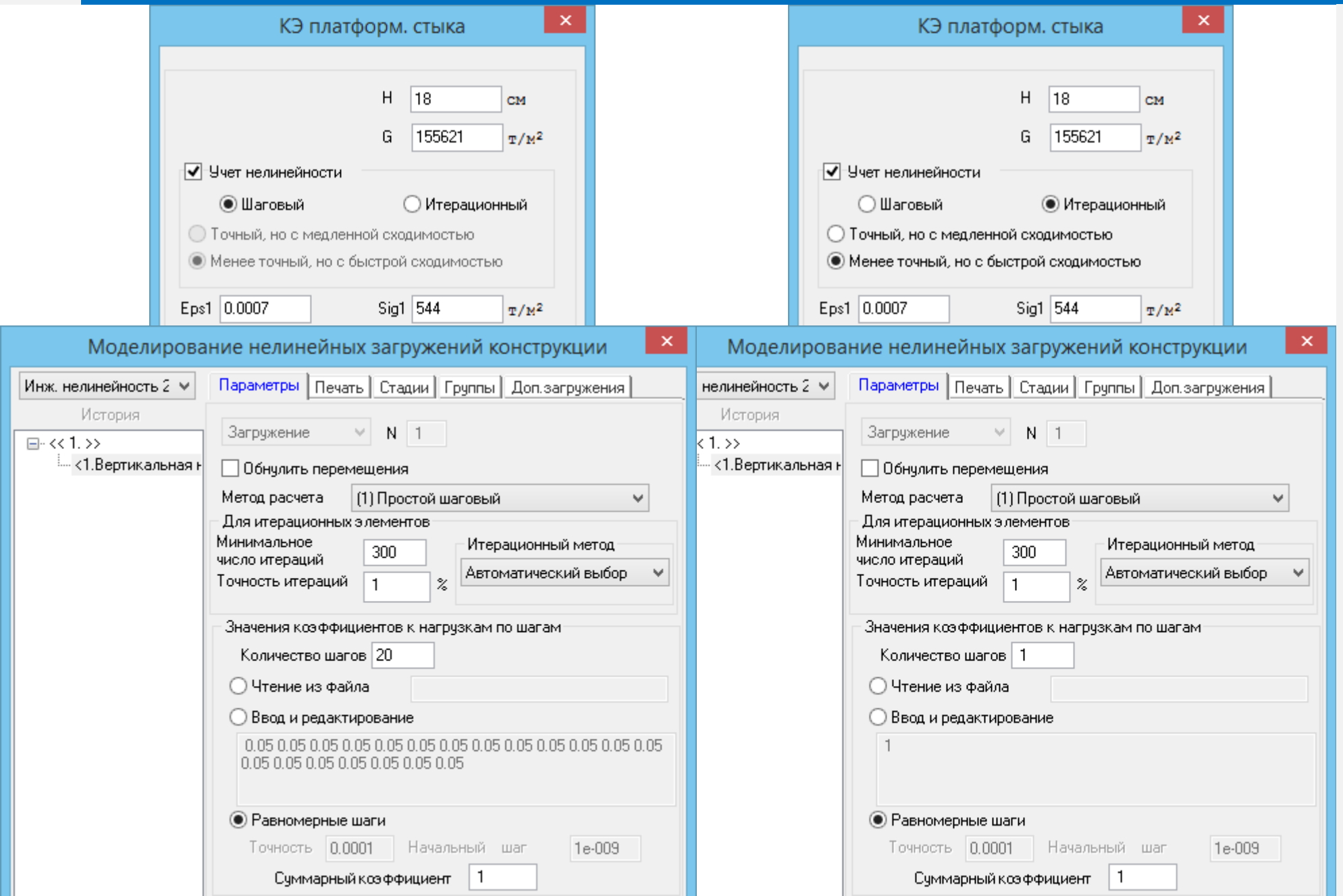
Элементы управления визуализацией остаточных жесткостей есть только в выпадающем меню (на Ленте или в Панелях инструментов этого нет).

В управлении стилем интерфейса включите «Меню», оно появится под Лентой. Но удобнее его припарковать вертикально с левой стороны окна программы.

Тестовые примеры в статике и динамике

Москва, 2020

Тестовые примеры в статике



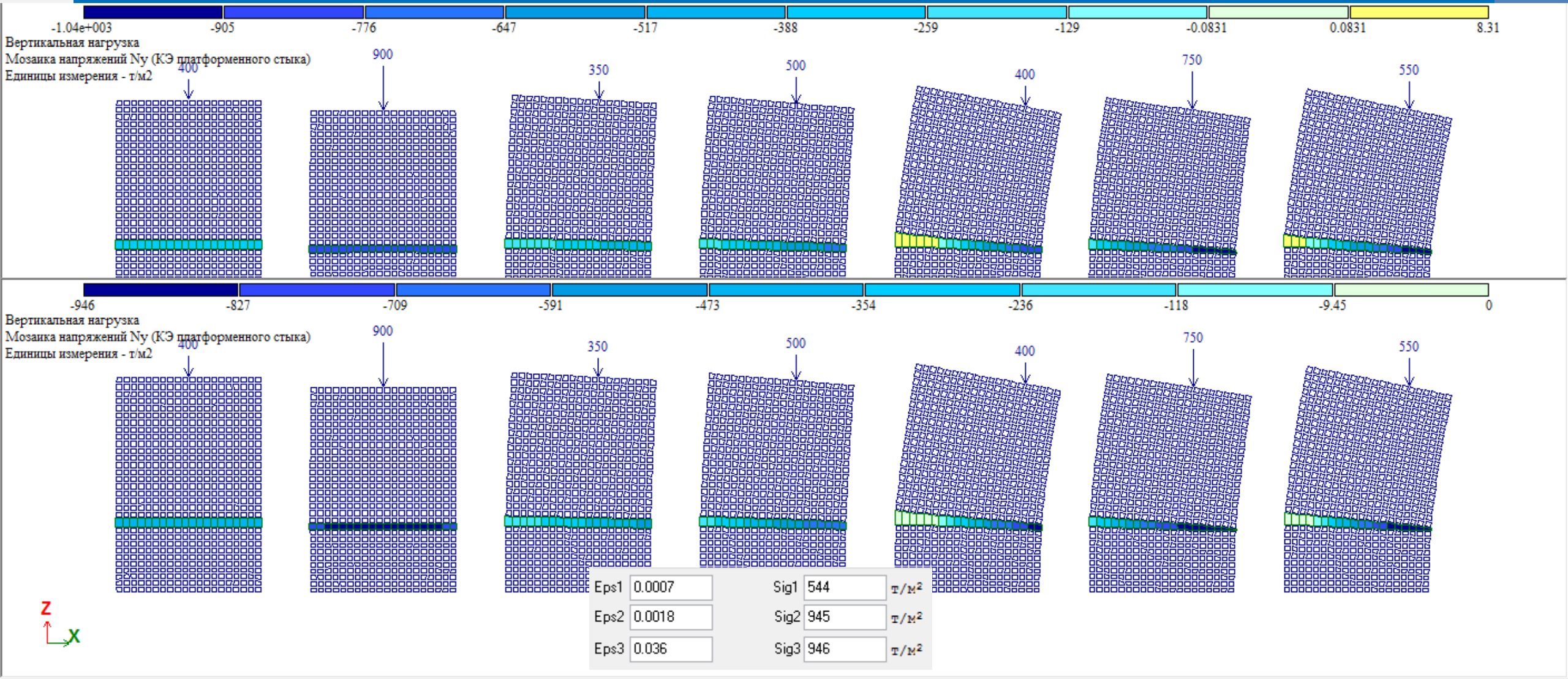
Возьмем рисунок 4.147 из замечательной книги под редакцией Г. Н. Ашкинадзе и М. Е. Соколова, и сравним результаты расчета на простых примерах в двух вариантах: итерационный и шаговый.

Здесь на слайде показаны заданные параметры нелинейной жесткости стыка и нелинейного расчета.

В шаговой постановке принято 20 шагов (обычно для шаговых физически нелинейных расчетов больше не задают, поскольку в больших схемах это критически сказывается на продолжительности расчета), в итерационном расчете принят 1 шаг (поскольку в данном примере не будет других шаговых элементов, то для расчета итерационных элементов одного шага нам достаточно).

Решаем задачу в постановке «Инженерная нелинейность 2», чтобы по итогу расчета получить редуцированные жесткости стыка (на сжатие и сдвиговые).

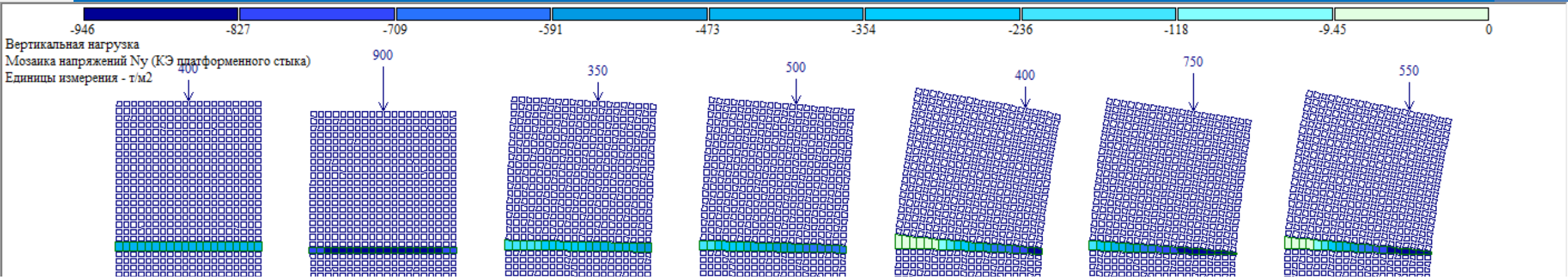
Тестовые примеры в статике



Обратим внимание: несмотря на достаточно много шагов (20), в задаче с шаговой нелинейностью есть области с величинами растяжения больше нуля и области максимального сжатия с величинами превышающими заданный предел. Уточнить расчет можно увеличением количества шагов, это уменьшит погрешность, но не сведет её к нулю.

В результатах с итерационным нелинейным расчетом стыка напряжение растяжение равно нулю, а максимальное сжатие не превышает заданного предела.

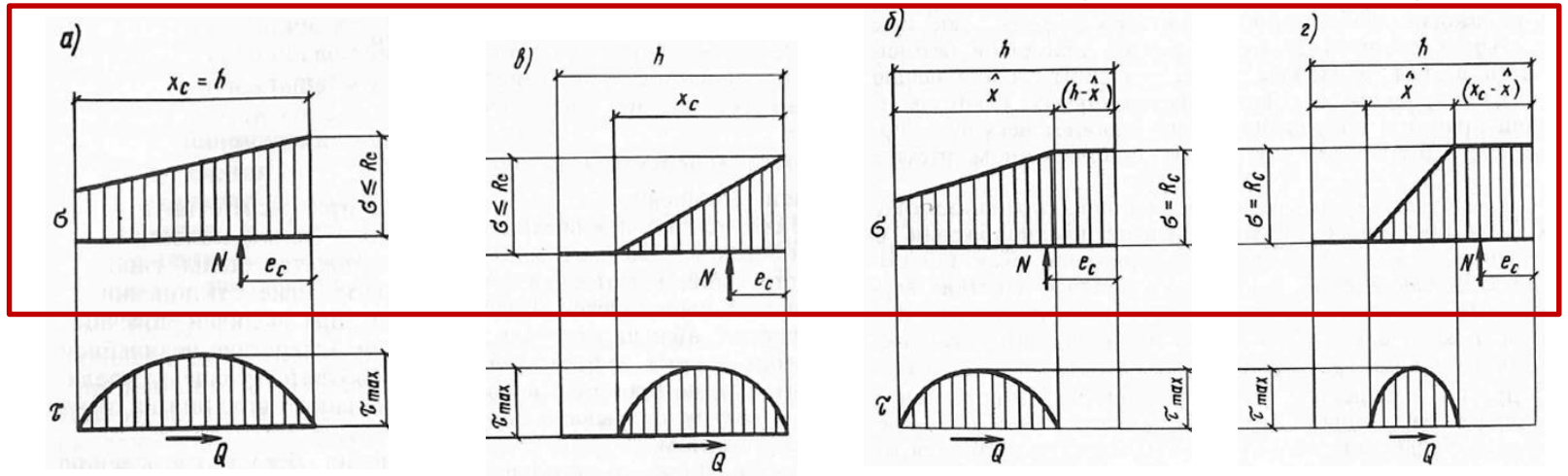
Тестовые примеры в статике



Сравним распределение напряжений сжатия в стыке по его длине для задачи с итерационным вариантом расчета с рис. 4.147.

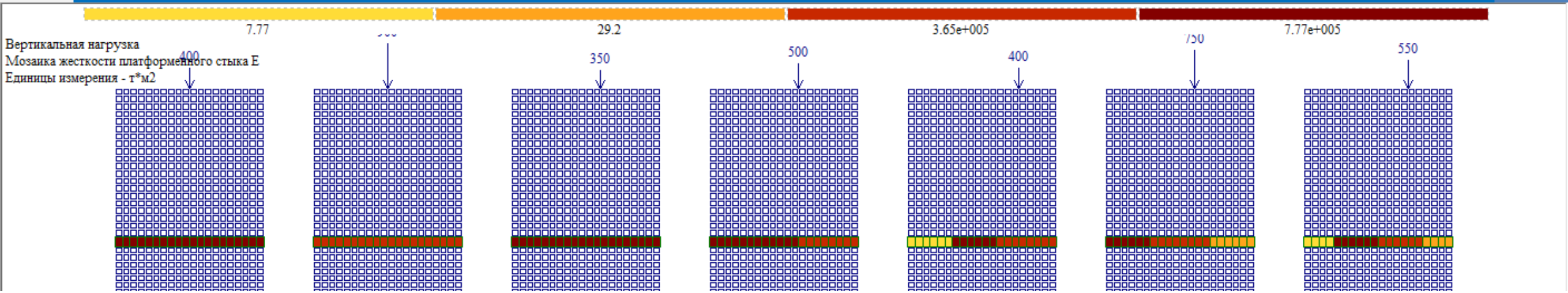
Рис. 4.147. Эпюры нормальных σ и касательных τ напряжений в горизонтальном сечении бетонной стены при совместном действии сжатия и сдвига

а, б — сжатие по всей длине стены соответственно для линейной и билинейной эпюр σ; в, г — сжатие на части длины стены

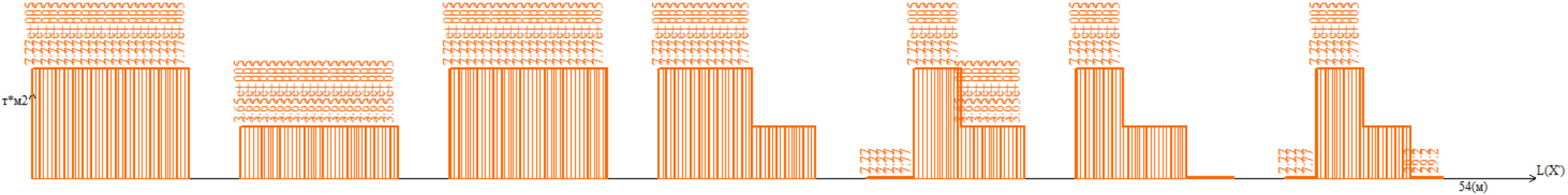


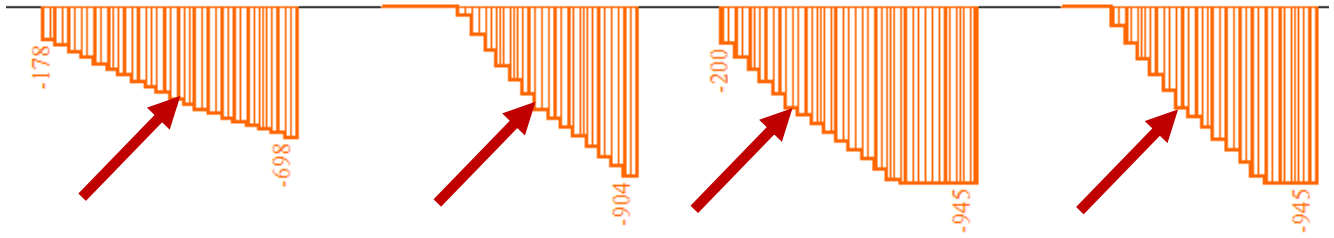
LIRA SAPR GROUP

Тестовые примеры в статике



Мозаика жесткости платформенного стыка E (Вертикальная нагрузка)



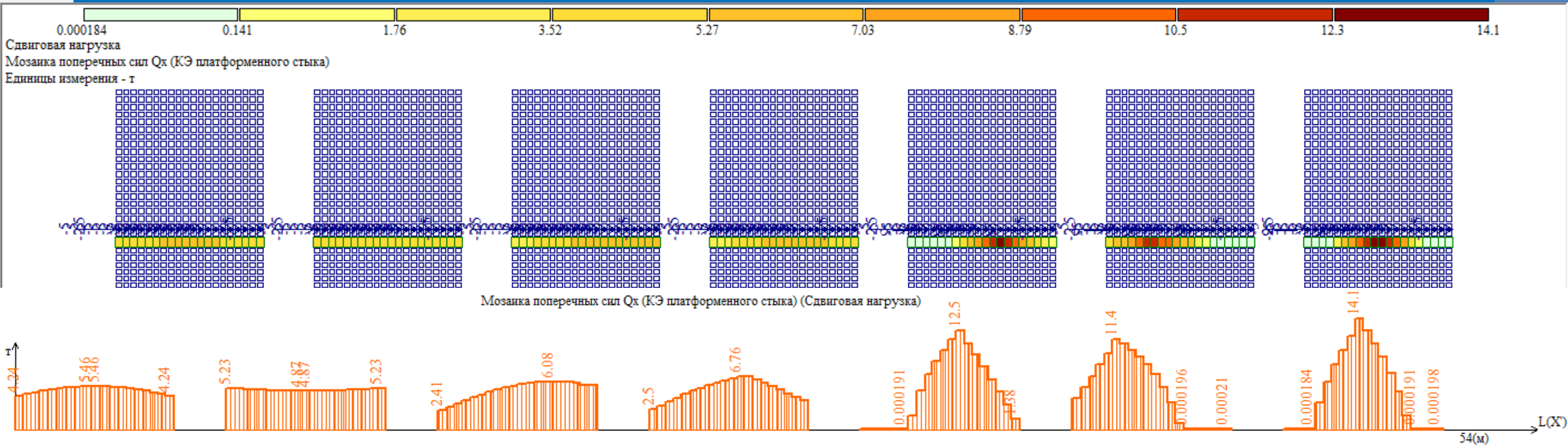


При этом жесткость на вертикальное сжатие меняется в зависимости от напряжения сжатия по заданной диаграмме.

На эпюре сжатия точки перелома (предыдущий слайд) – это точки изменения жесткости КЭ стыка при достижении напряжения σ_{m1}.

Важно понимать – жесткости зафиксированные на последней стадии монтажа в «Инженерная нелинейность 2», для после-стадийных загружений работают линейно.

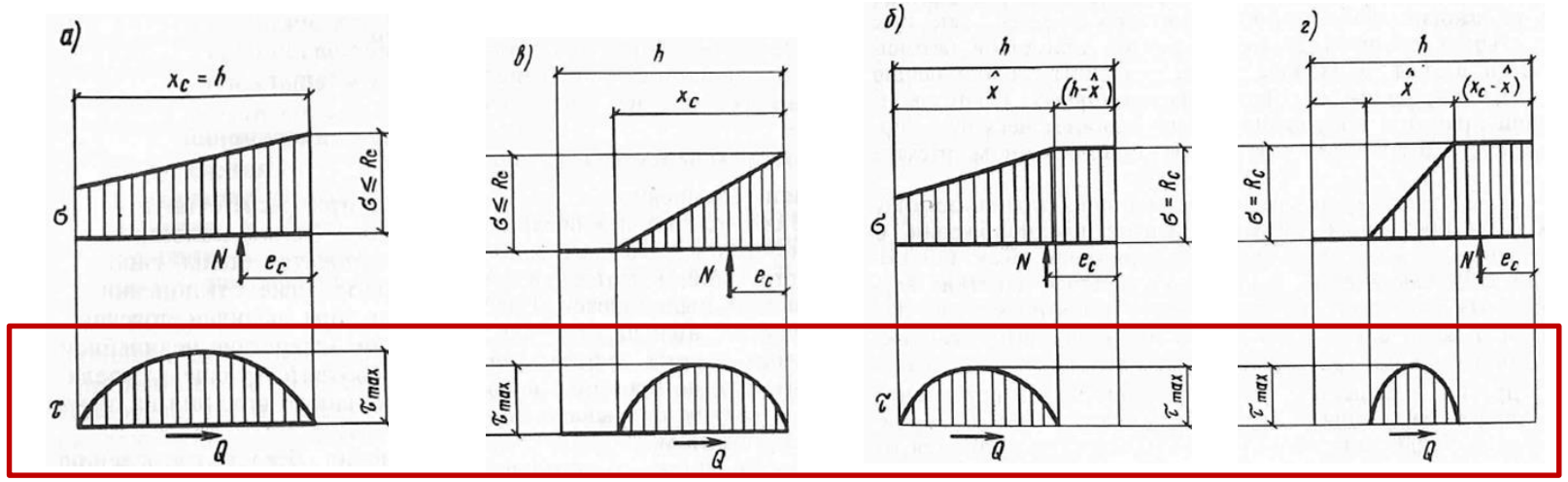
Тестовые примеры в статике



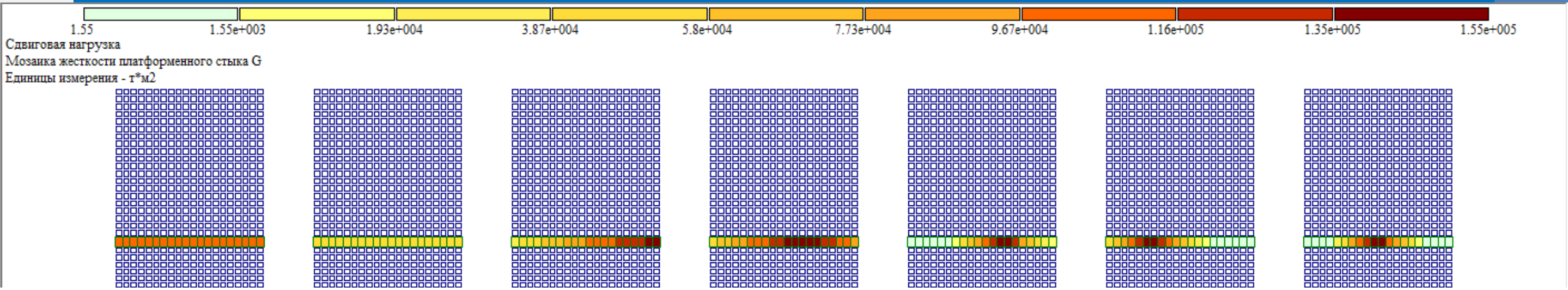
Сравним распределение напряжений сдвига вдоль стыка. На концевых участках стыка значение Qx не равно нулю, поскольку напряжения в КЭ стыка вычисляются в центре его тяжести.

Рис. 4.147. Эпюры нормальных σ и касательных τ напряжений в горизонтальном сечении бетонной стены при совместном действии сжатия и сдвига

а, б — сжатие по всей длине стены соответственно для линейной и билинейной эпюр σ; в, г — сжатие на части длины стены



Тестовые примеры в статике



При этом жесткость сдвига меняется в зависимости от напряжения сжатия по заданному закону.

Крайние точки стыка испытывают разный уровень напряжений, поэтому на концевых участках соответствующая сдвиговая жесткость. То же можно сказать и о максимальной жесткости стыка на эпюре по разрезу: центр тяжести КЭ около этого пика может не точно попасть в точку перелома жесткости на сжатие, поэтому полученная пиковая жесткость сдвига может немного отличаться от заданного максимального значения.

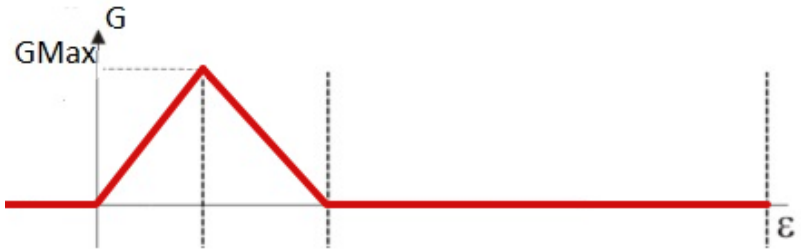
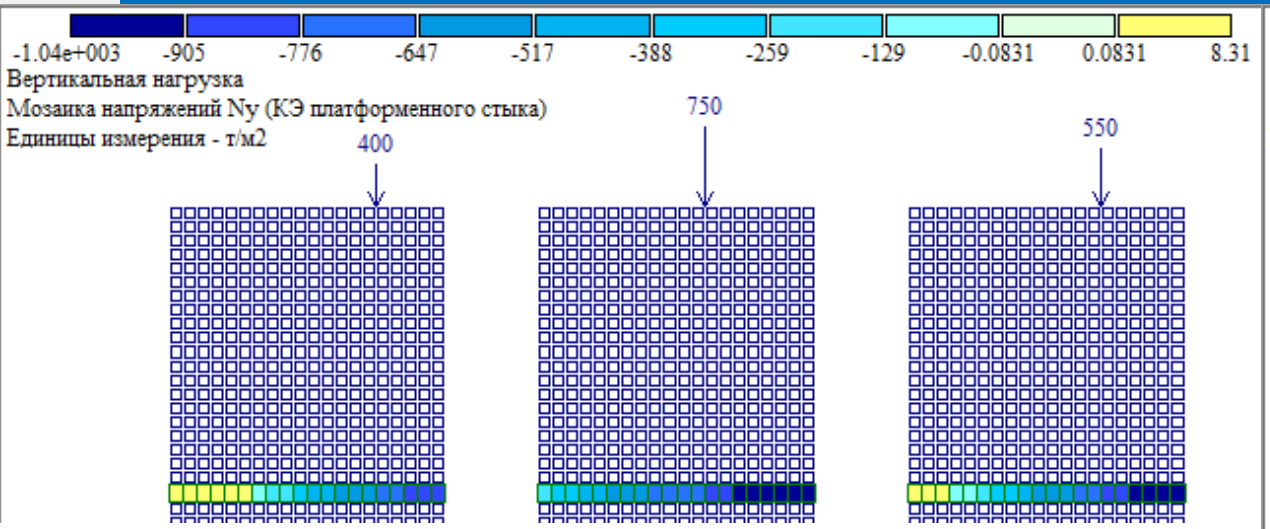
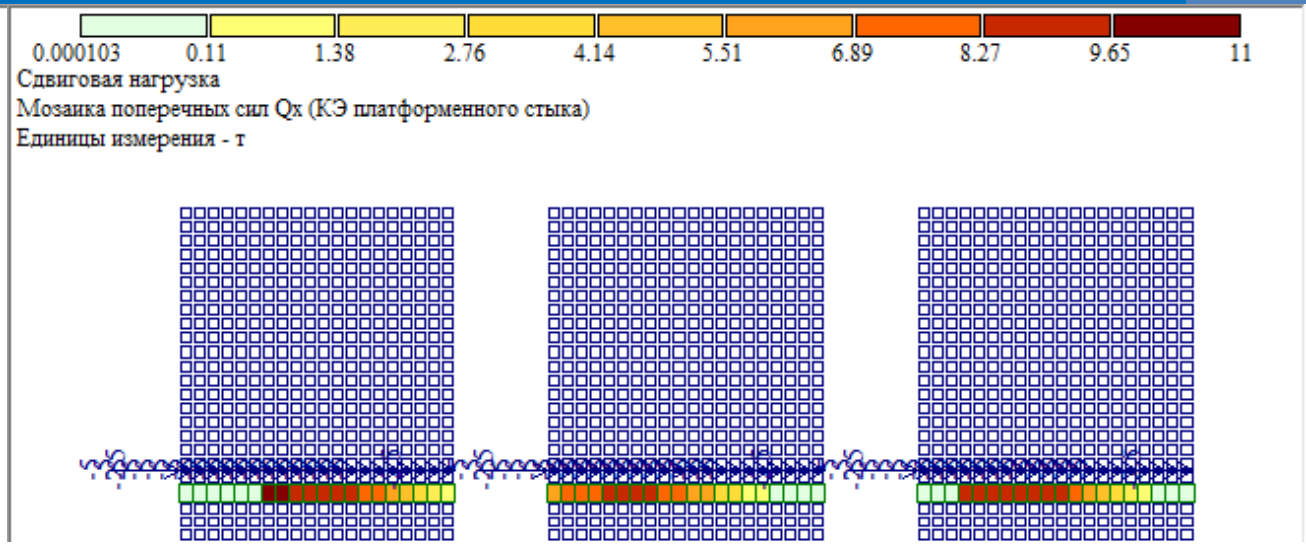
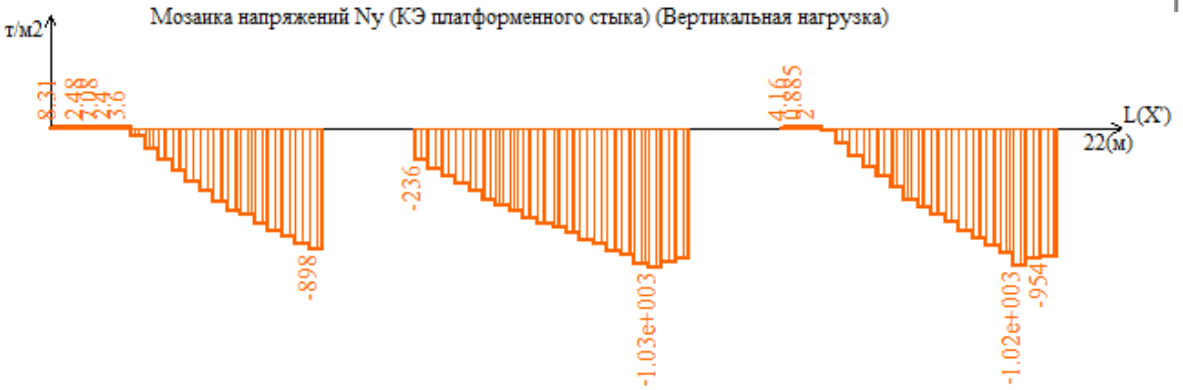


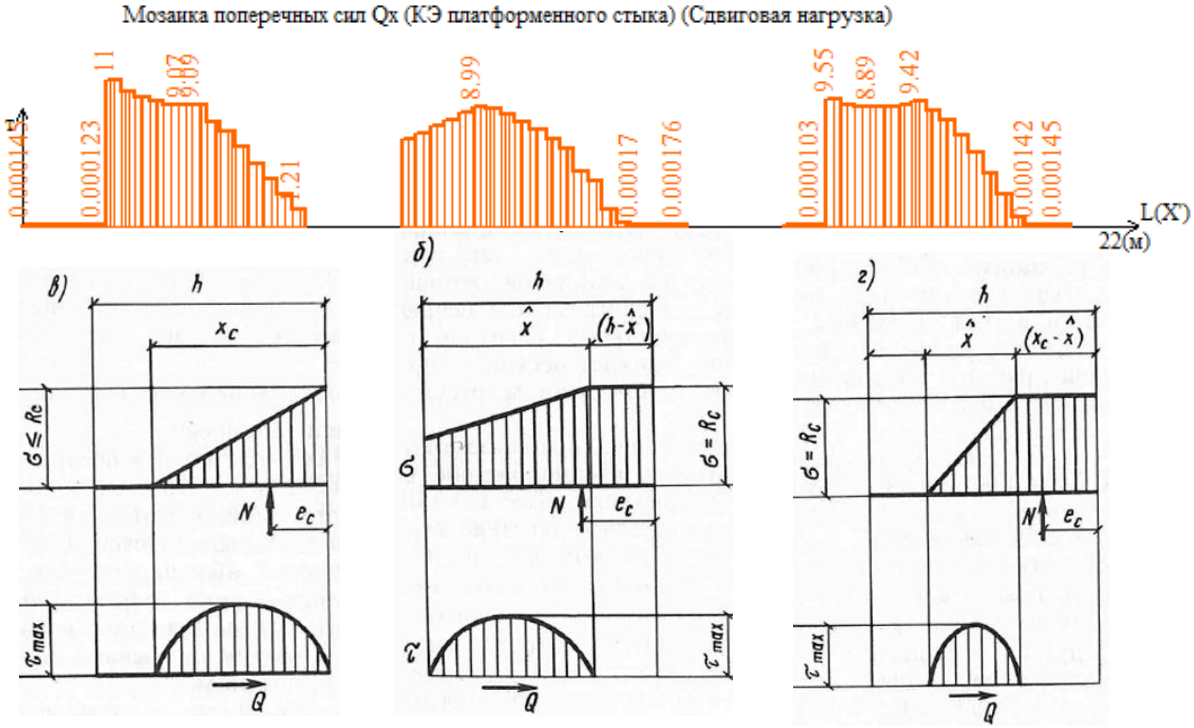
Рис.2

Тестовые примеры в статике



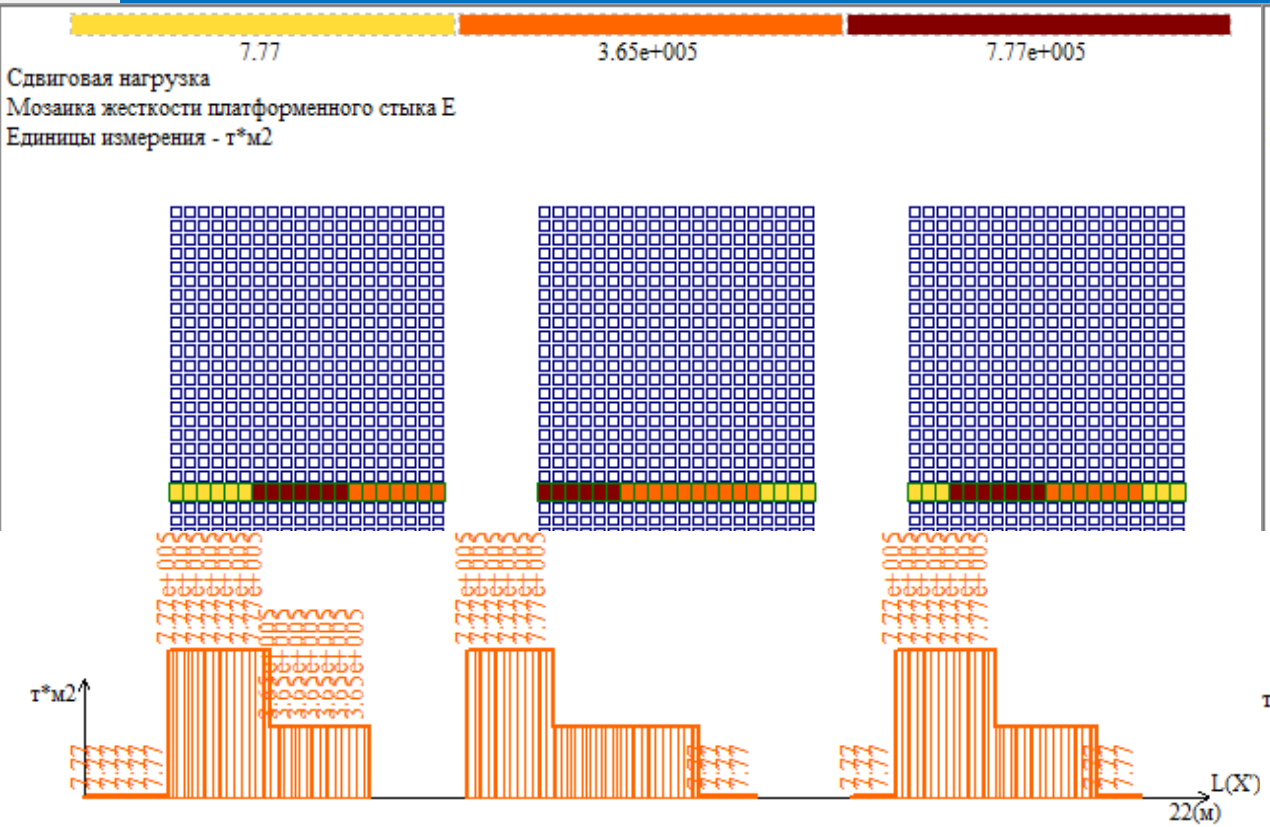




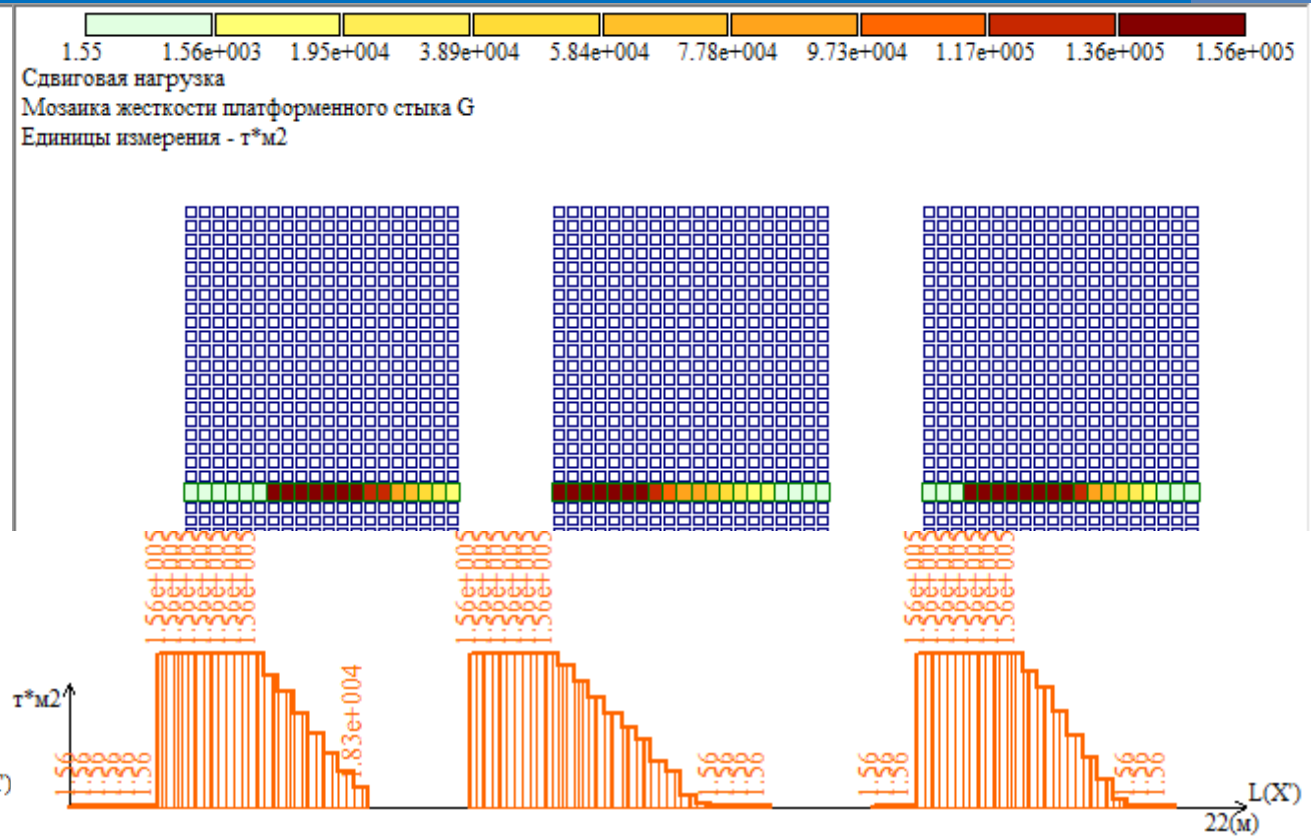


Тоже самое для шагового варианта расчета, но покажем только на примерах с предельными напряжениями.

Тестовые примеры в статике



Мозаика жесткости платформенного стыка E (Вертикальная нагрузка)



Мозаика жесткости платформенного стыка G (Вертикальная нагрузка)

Жесткость сдвига так же меняется в зависимости от напряжения сжатия по заданному закону (для шагового КЭ, в данном случае).

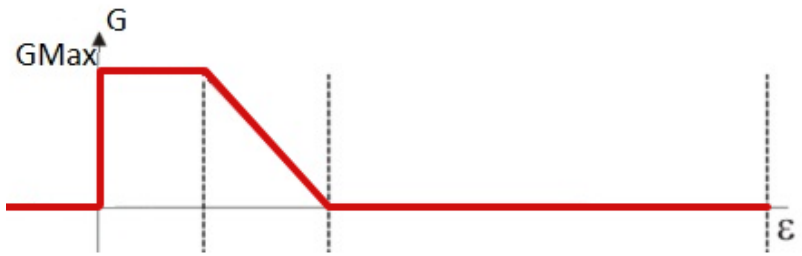
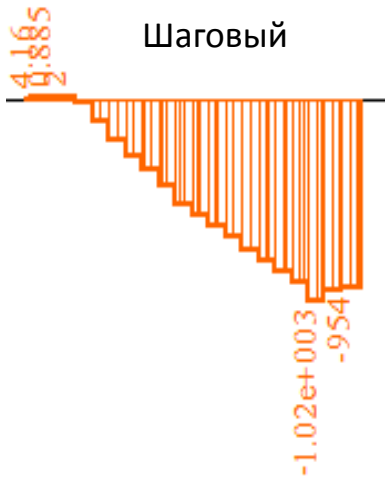


Рис.3

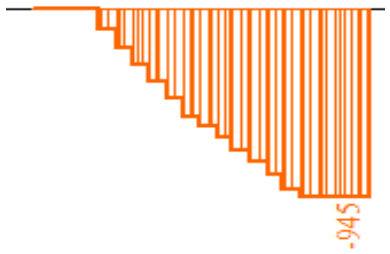
Тестовые примеры в статике

Напряжения сжатия

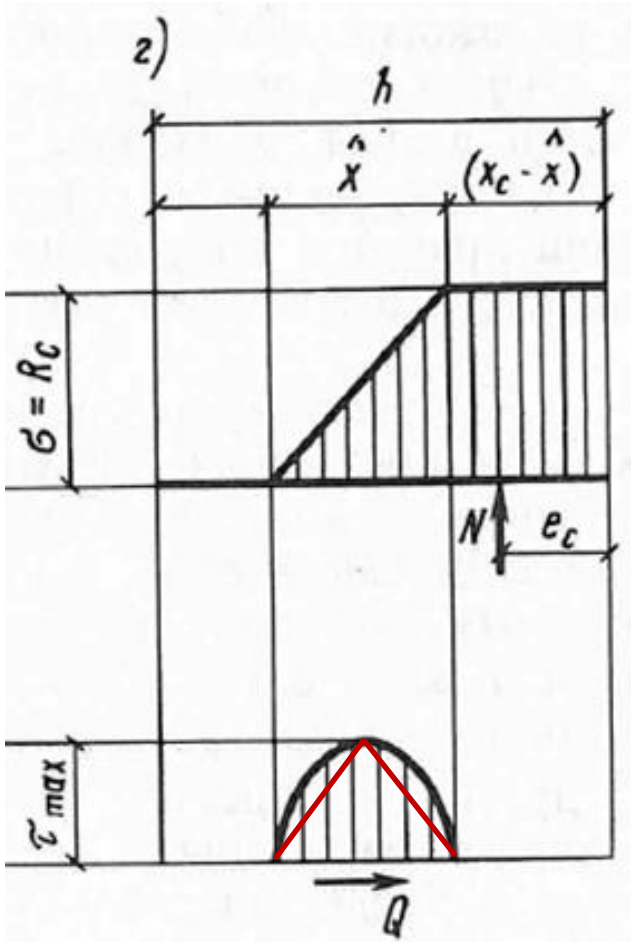
Шаговый

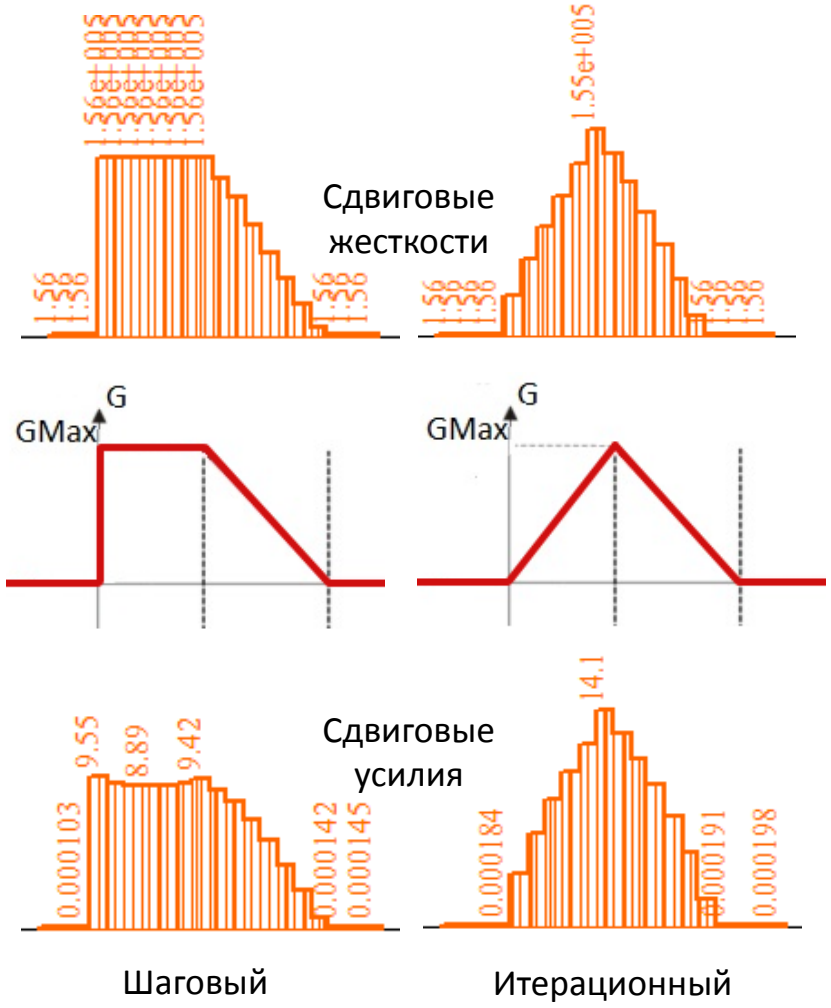


Итерационный



Eps1	0.0007	Sig1	544	т/м²
Eps2	0.0018	Sig2	945	т/м²
Eps3	0.036	Sig3	946	т/м²

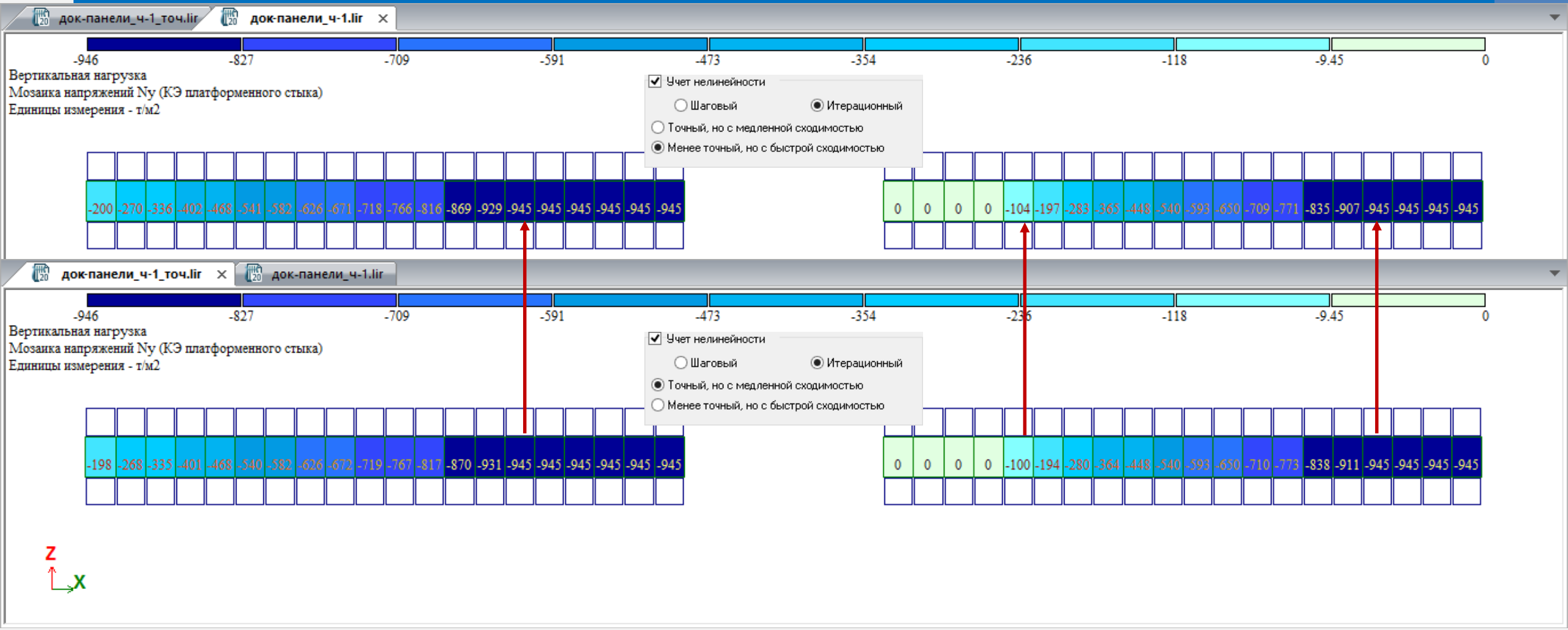




Сделаем выводы из сравнения на этих примерах:

1. в итерационных КЭ стыка точнее достигаются предельные значения напряжений;
2. сдвиговая жесткость полученная по треугольному закону (итерационный КЭ) приводит к напряжениям сдвига распределенному вдоль стыка больше похожим на описанные в литературе, причем с небольшим запасом.

Тестовые примеры в статике

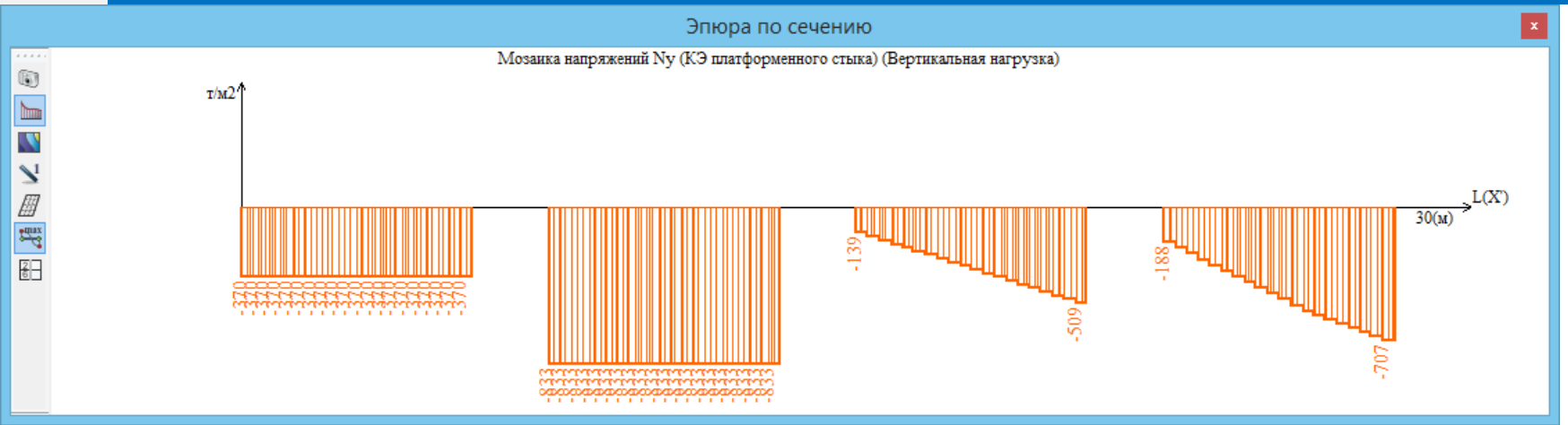


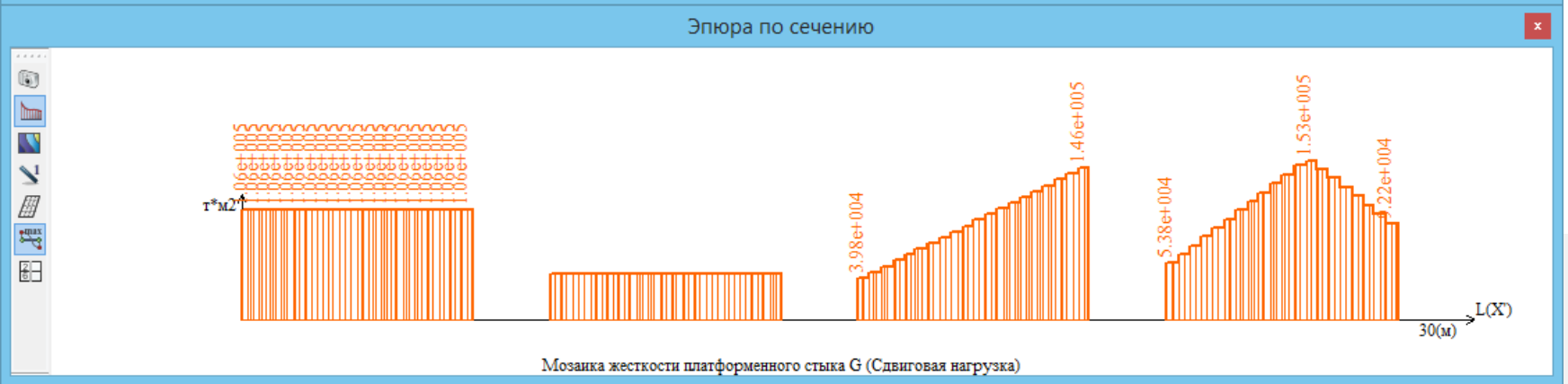
В данном случае, погрешность при выборе «менее точного» в сравнении с «точным» получилась:

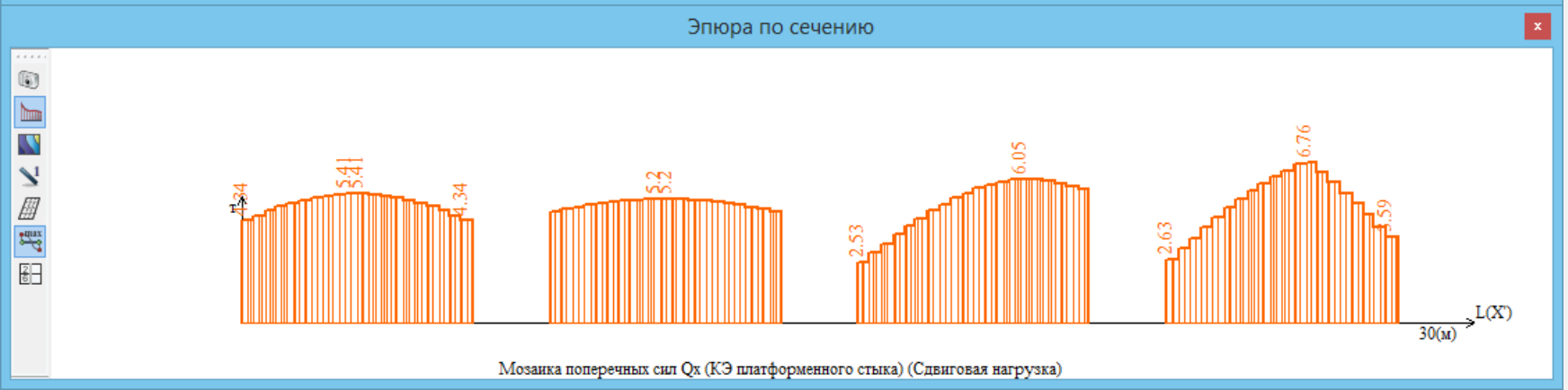
- по пиковым значениям погрешность нулевая (растянутые КЭ с нулевым напряжением, предельно сжатые с предельным заданным значением);
- по длине стыка в значениях между предельными максимальная погрешность 4% (104/100).

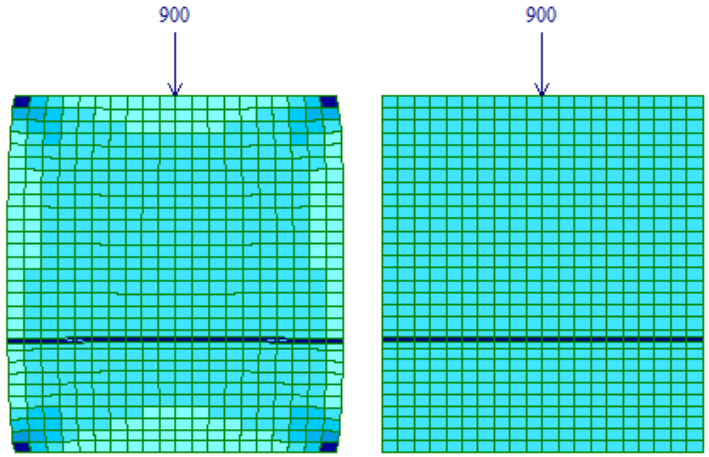
Что вполне приемлемая цена за существенное сокращение времени расчета.

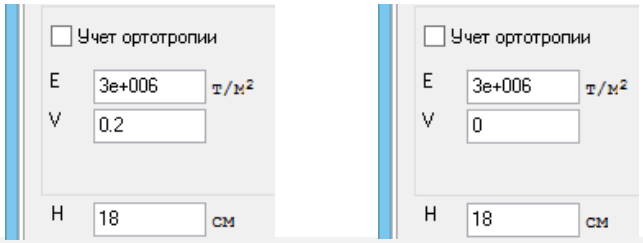
Тестовые примеры в статике





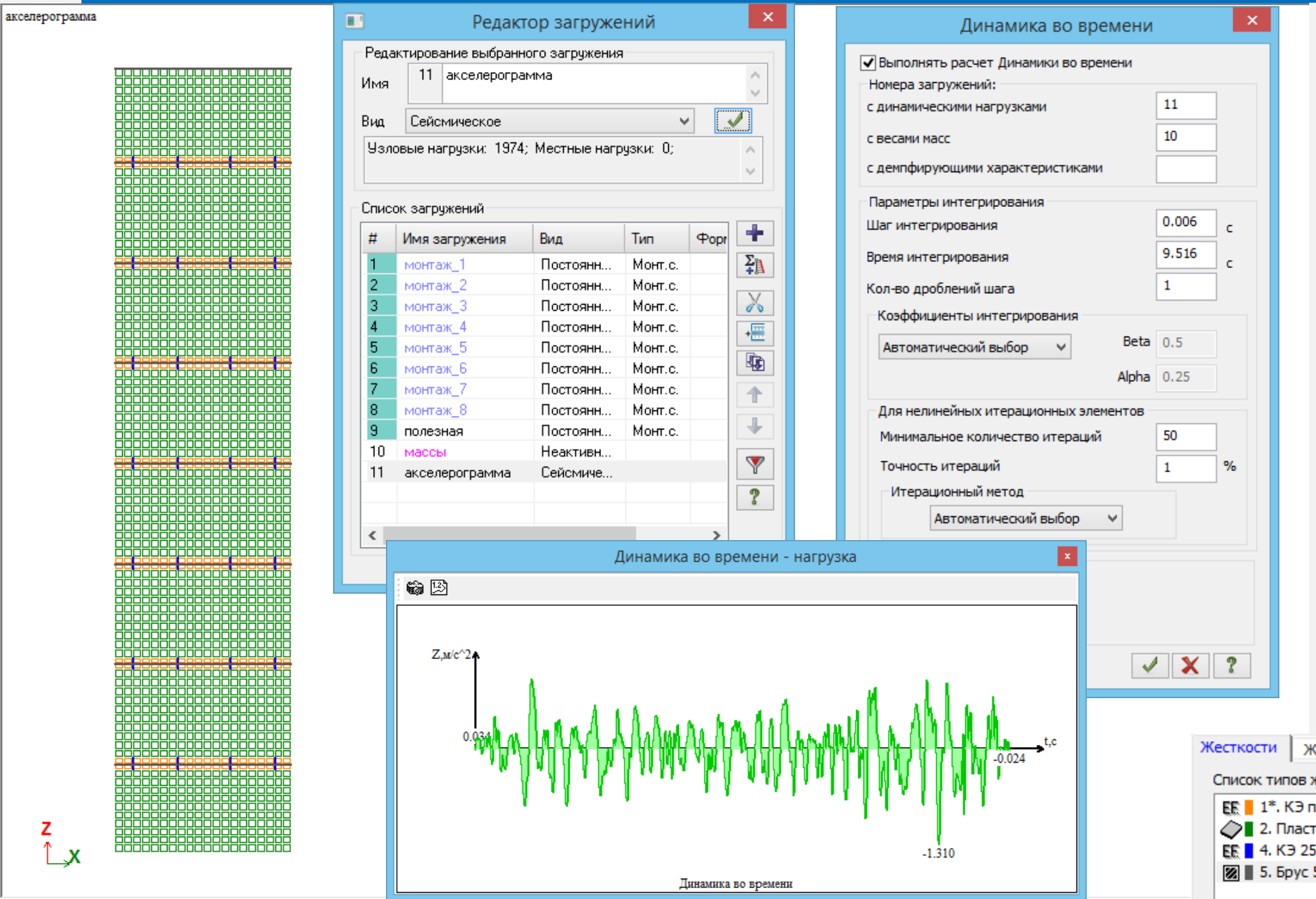






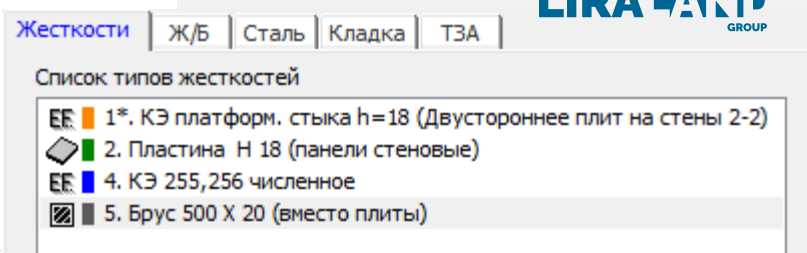
Небольшое отступление – почему некоторые эпюры по сечению КЭ стыков по длине стыка выглядят «не ровными»/«не строго как задано в диаграмме работы»? Дело в том, что стык не работает сам по себе, он является связью между конструктивными элементами. Вертикальные напряжения в стеновых панелях даже при абсолютно равномерном нагружении не будут «ровными», поскольку в расчете мы учитываем коэффициент поперечной деформации (коэффициент Пуассона). Но если его обнулить, то визуально всё станет «ровно», «как в книжке», хотя уже не «как на самом деле».

Тестовые примеры в динамике

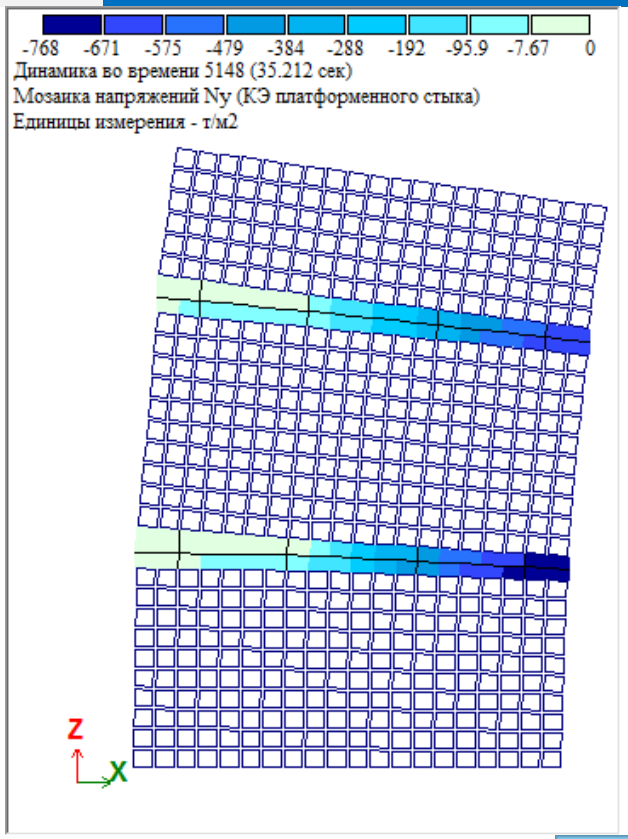


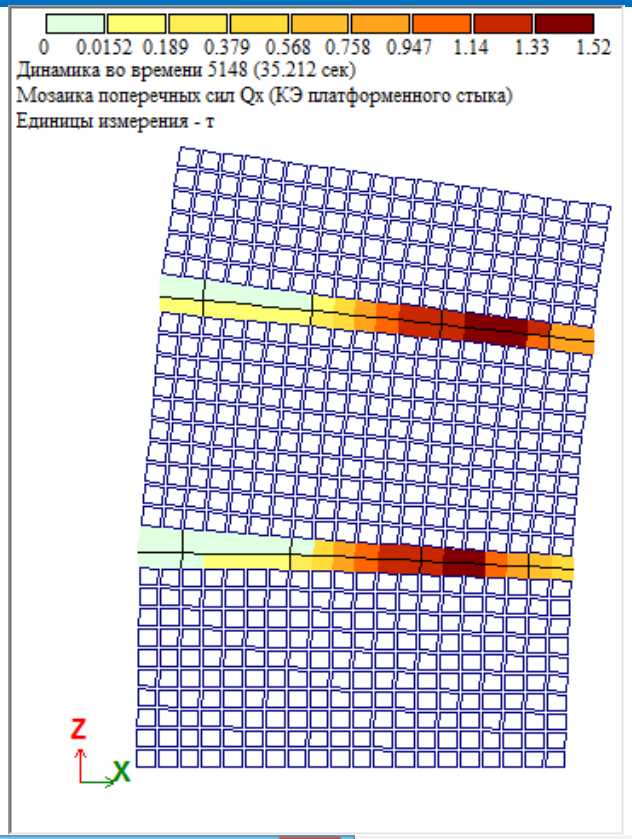
Еще одно преимущество дает применение итерационных КЭ стыка – возможность прямого интегрирования во времени (Динамика-плюс), что позволит сделать расчет на сейсмическое воздействие в виде акселерограммы (МРЗ, например) или решить задачу динамического локального отказа (прогрессирующее обрушение).

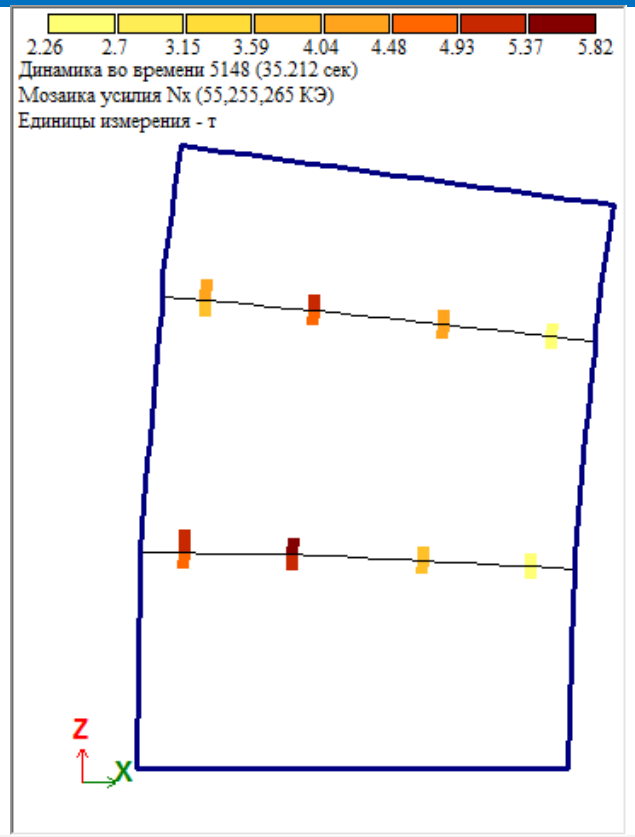
Сделаем тестовую задачу – столб из стеновых панелей в плоской постановке. С учетом монтажа и заданной акселерограммы по оси X.

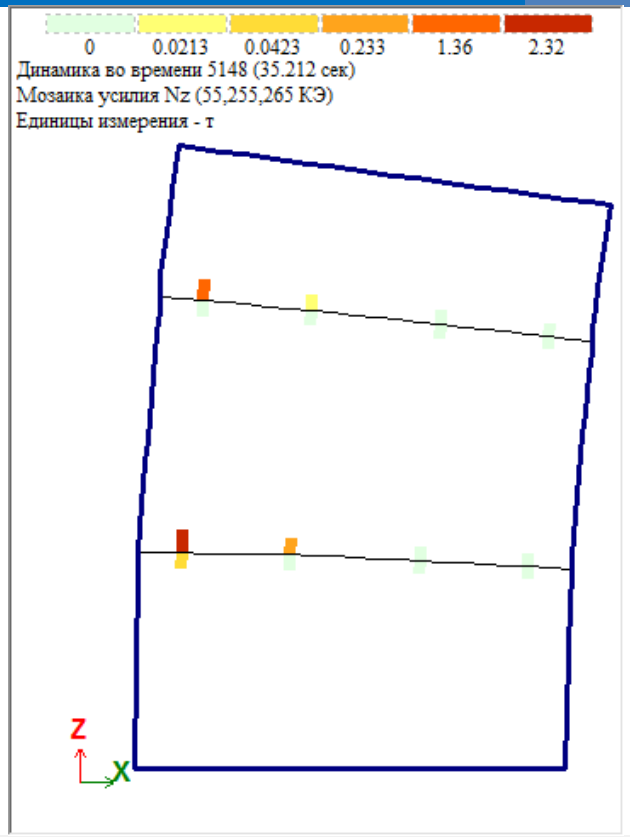


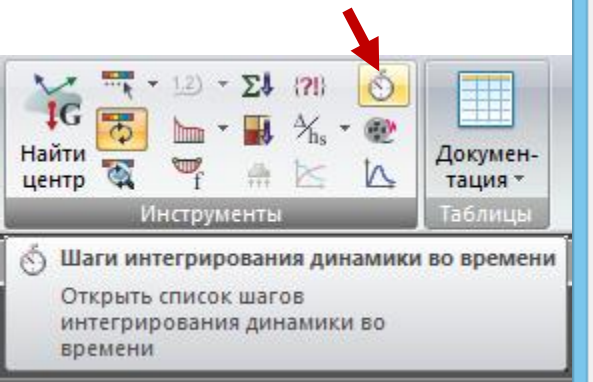
Тестовые примеры в динамике

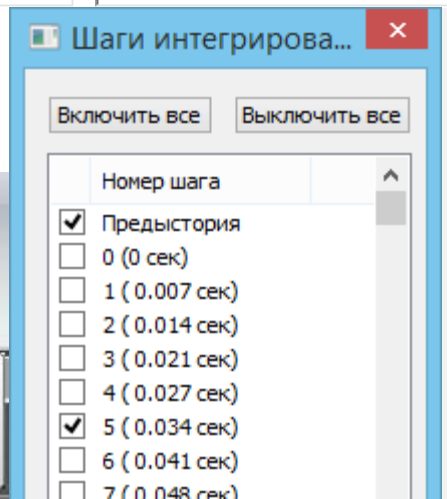








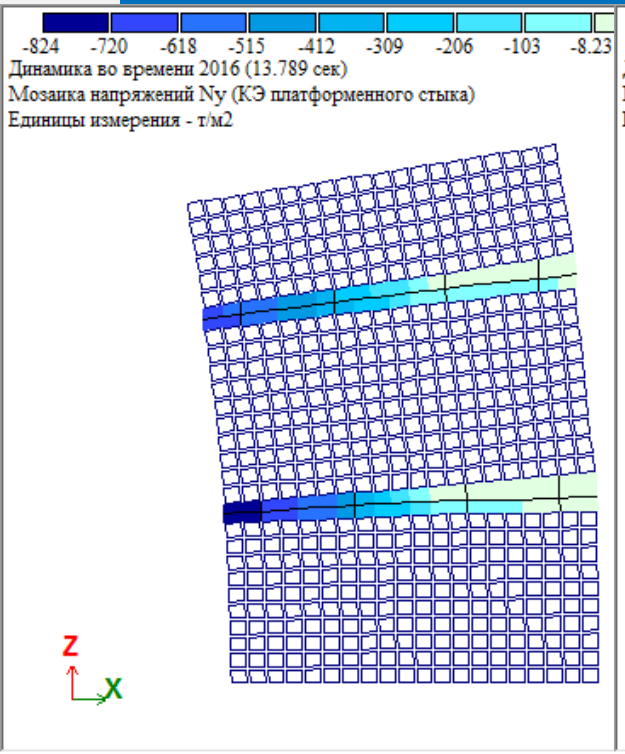




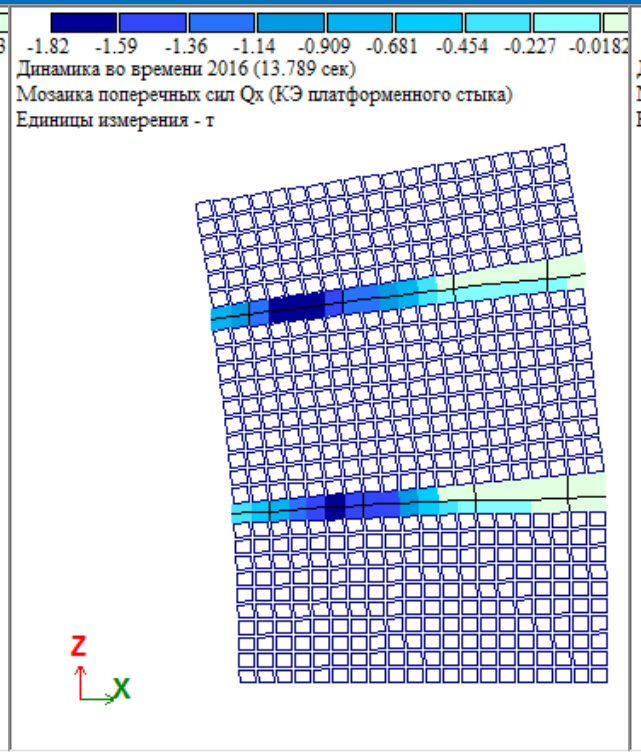
Результаты расчета модуля Динамики-плюс состоят из общей предистории (заданной истории нагружения) и моментов времени в процессе воздействия. Можно вызвать меню Шаги интегрирования, и задать нужные моменты времени для просмотра.

Здесь мы видим, как тестовый столб из панелей качнулся вправо. А так же можем посмотреть все виды напряженно-деформированного состояния конструкции, которые этому сопутствуют. В данном случае нас интересуют элементы горизонтального стыка.

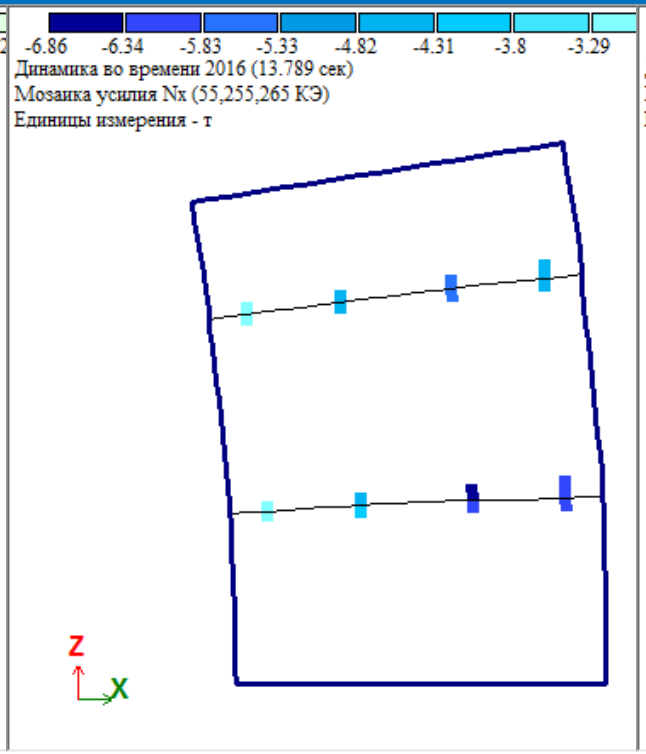
Тестовые примеры в динамике



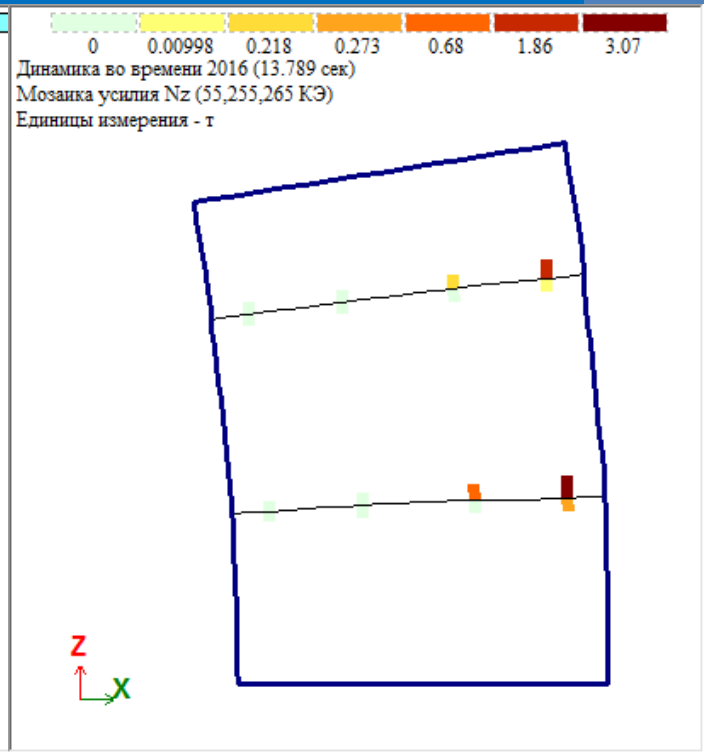
Напряжения сжатия стыка



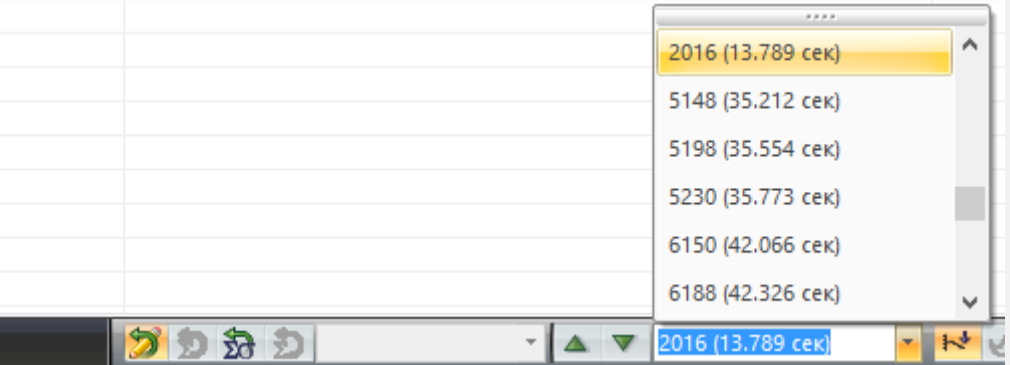
Сдвиговые нагрузки КЭ стыка



Сдвиговые усилия КЭ255



Усилия на разрыв КЭ255



Выбранные моменты времени доступны для просмотра из меню «Загружения анализа».

Здесь мы видим, как тестовый столб из панелей качнулся уже влево, и сопутствующие этому усилия: включение дополнительных связей (шпонок/арм. выпусков) на растяжение при «открытии» стыка и перераспределение напряжений сдвига по длине стыка.

Тестовые примеры в динамике

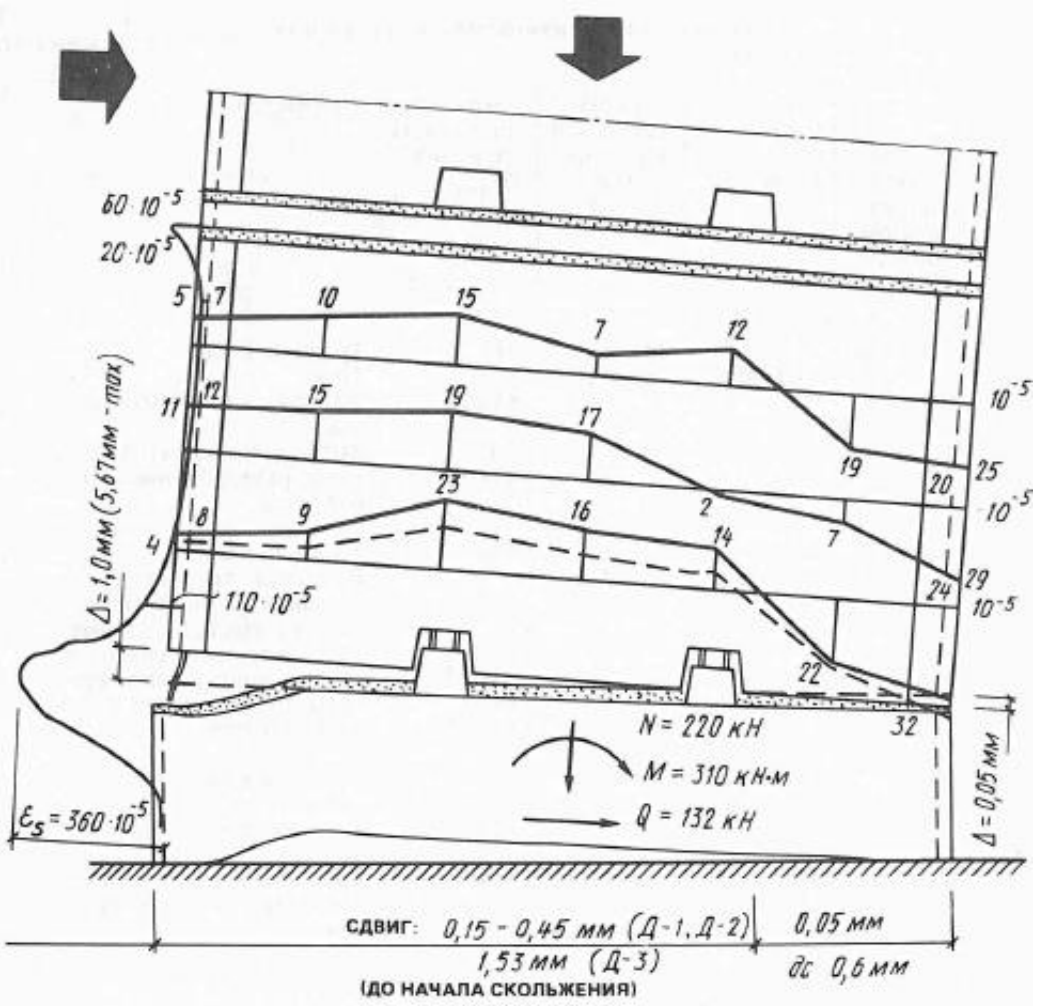
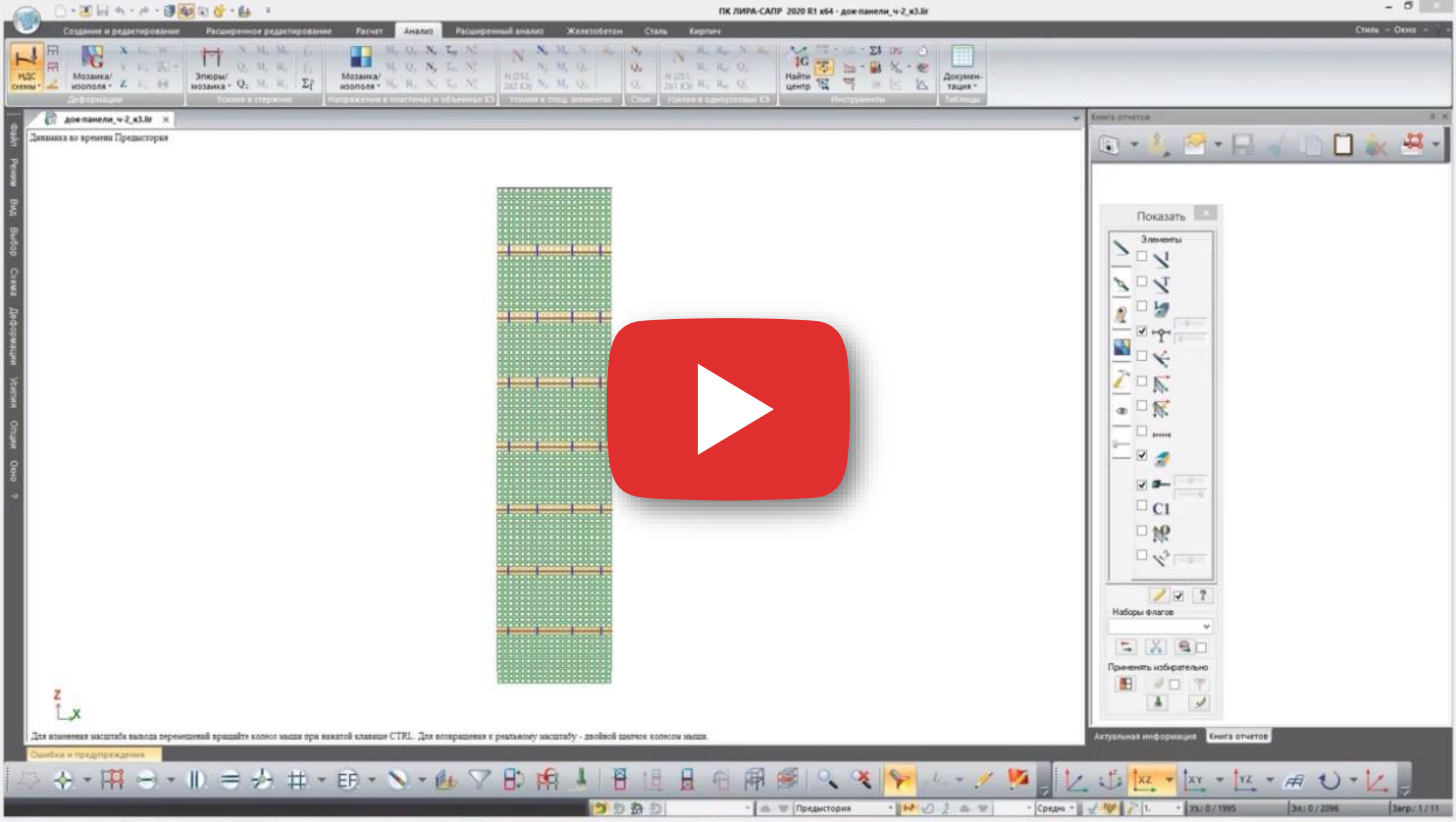


Рис. 3.51. Деформированное состояние модели стены Д-1 при испытаниях (штриховая линия – для Д-3)

Характер работы горизонтального стыка с дополнительными связями в численной модели похож на схему деформирования на рисунке 3.51 из книги под редакцией Г. Н. Ашкинадзе и М. Е. Соколова.

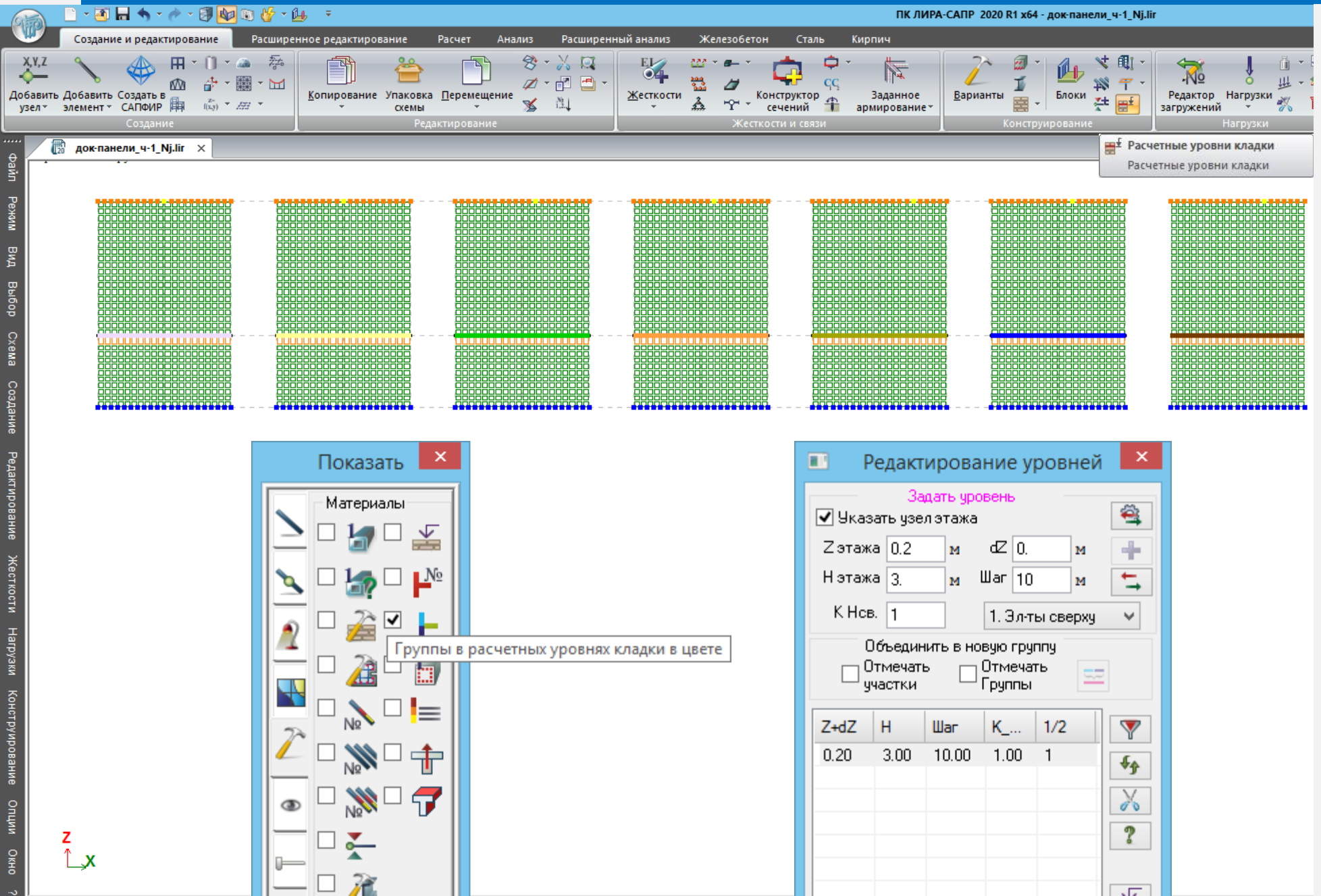
А детали зависят уже от исходных данных. Например, учитывать динамические характеристики стыка или нет (на основе численного или натурного эксперимента можно получить нужные характеристики, и заложить уточнённую работу стыка в диаграмме).


ПК ЛИРА-САПР 2020 R1 x64 - дом-панели_ч-2_к3.lir
Создание и редактирование
Расширенное редактирование
Расчет
Анализ
Расширенный анализ
Железобетон
Сталь
Кирпич
Мозаика/ изополя
Эпюры/ мозаика
Найти центр
Докумен-тация
дом-панели_ч-2_к3.lir
Динамика во времени Предыстория
Показать
Элементы
Наборы флагов
Применять избирательно
Актуальная информация
Книга отчетов
Ошибки и предупреждения
Предыстория

Проверка несущей способности горизонтального стыка

Москва, 2020

Назначение Уровней и разбиение на Простенки



Для начала назначим на границе стеновой панели и КЭ стыков Уровень, причем в параметрах триангуляции на простенки зададим большое значение, чтобы при разбивке получился один простенок на стеновую панель.

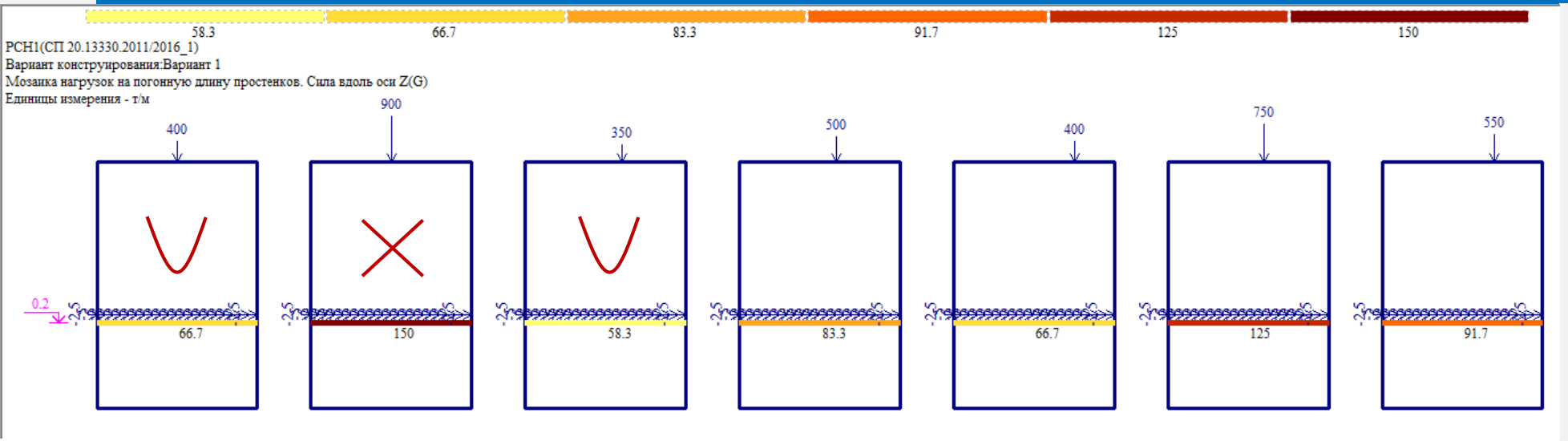
Терминология:

Уровень – горизонтальное сечение по зданию, которое формирует подобие кладочного плана (нагрузки собираются из узловых реакций, поэтому на этом срезе узлы не должны отклоняться по вертикали, иначе элементы стены автоматически будут разбиты, и могут получится некорректные элементы).

Группа – несколько участков объединенных в единое целое для сбора нагрузок (в привычной терминологии это можно назвать Простенок).

Участок – проекция вертикального пластинчатого элемента на горизонтальную плоскость заданную Уровнем (точнее – расстояние между двумя узлами вертикального элемента, которыми он лежит на Уровне).

Проверка несущей способности на сжатие



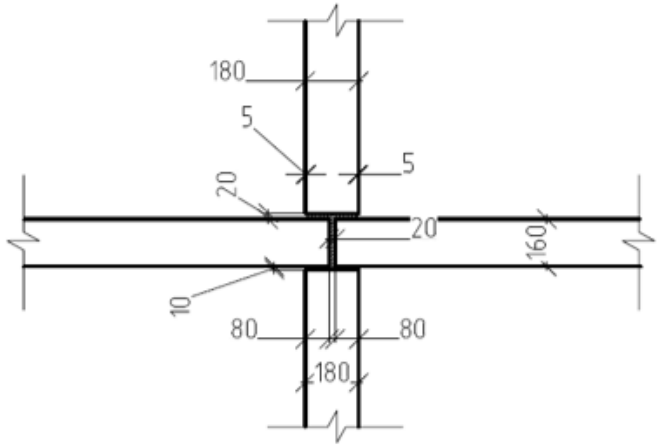
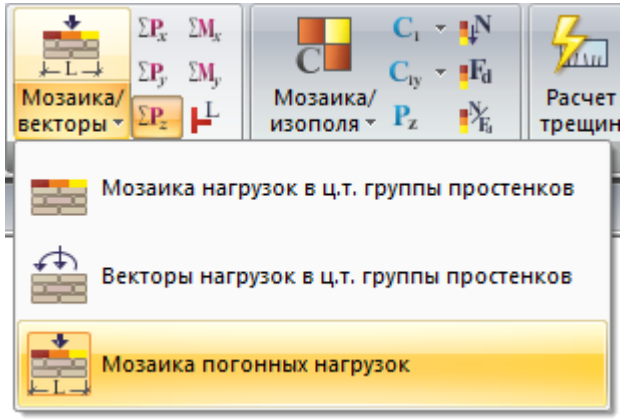


Рис. 11.3. Схема платформенного стыка при двухстороннем опирании плит перекрытий



Вариант 1: класс бетона стеновых панелей B25, плиты перекрытия B20, раствор марки M100.

Расчет ведем на 1м.п. стыка.

Несущая способность горизонтального стыка при сжатии при продолжительном действии нагрузок:

$$N_{j,long} = 5.462 \cdot 180 \cdot 1000 = 983160H = \mathbf{102.26тс};$$

Поскольку мы привели несущую способность стыка на сжатие к метру погонному (посчитать несущую способность стыка удобно в Excel), то включаем мозаику погонных нагрузок.

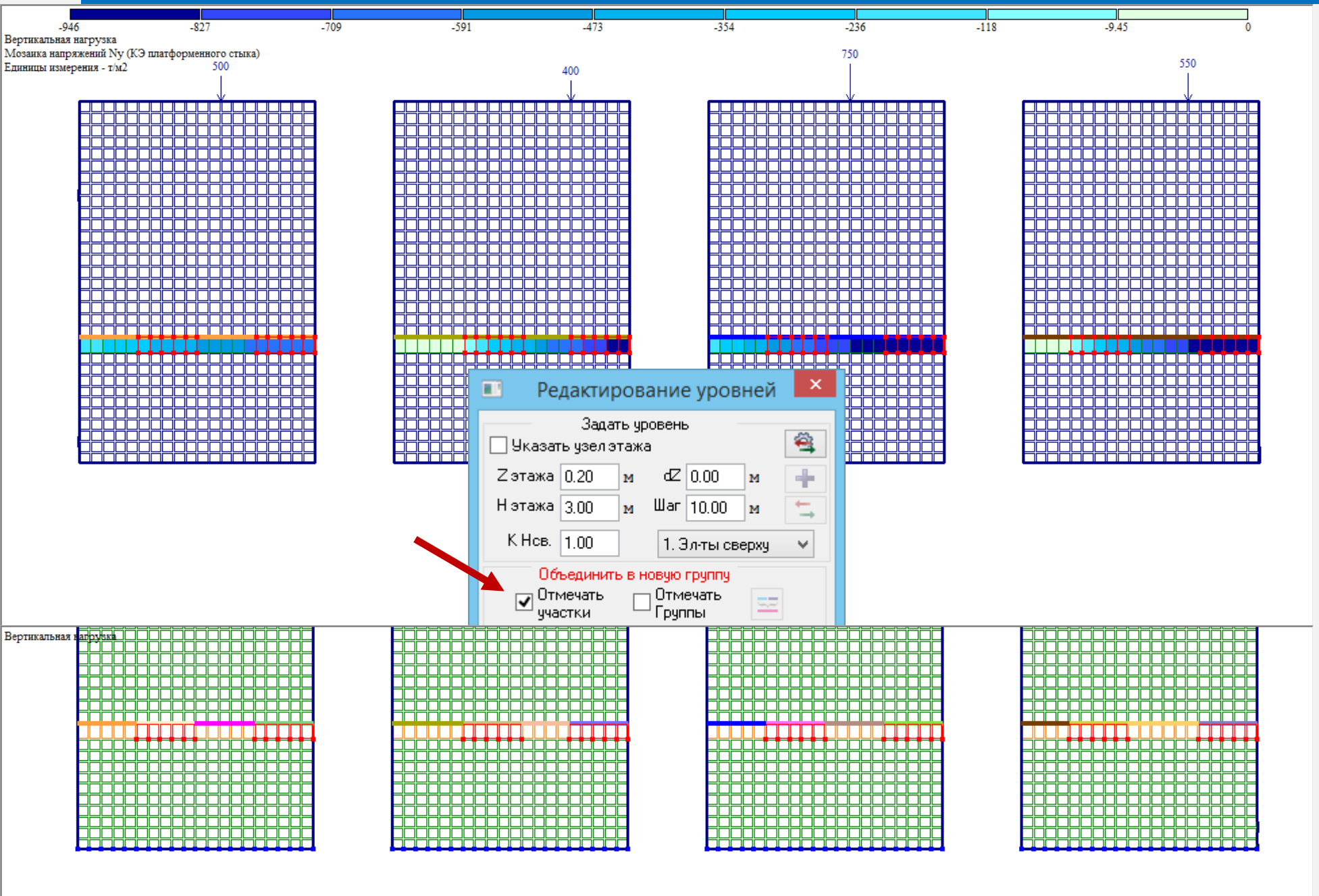
Из данных примеров видно, что центрально нагруженные и с малым эксцентриситетом 1 и 3 стыки проходят по несущей способности, а 2 точно не проходит. И здесь не важно на какого размера фрагменты мы будем разделять стык по его длине (распределение вдоль стыка сжимающих напряжений можно посмотреть выше).

Остановим свое внимание на стыках 4-7.

Замечание: при расчете несущей способности стыков должно получиться 2 величины – для продолжительного действия и непродолжительного (см. СП 63.13330.2012 п.6.1.12). Поэтому для сравнения с действующими усилиями в стыке (простенках) нужно создавать соответствующие комбинации РСН.

Напомню, в докладе https://rflira.ru/files/events/2019/materials/LIRA-SAPR_Panel_100+2019.pdf на слайдах 50-56 вопрос расчета несущей способности стыка рассмотрен детальнее.

Назначение Уровней и разбиение на Простенки



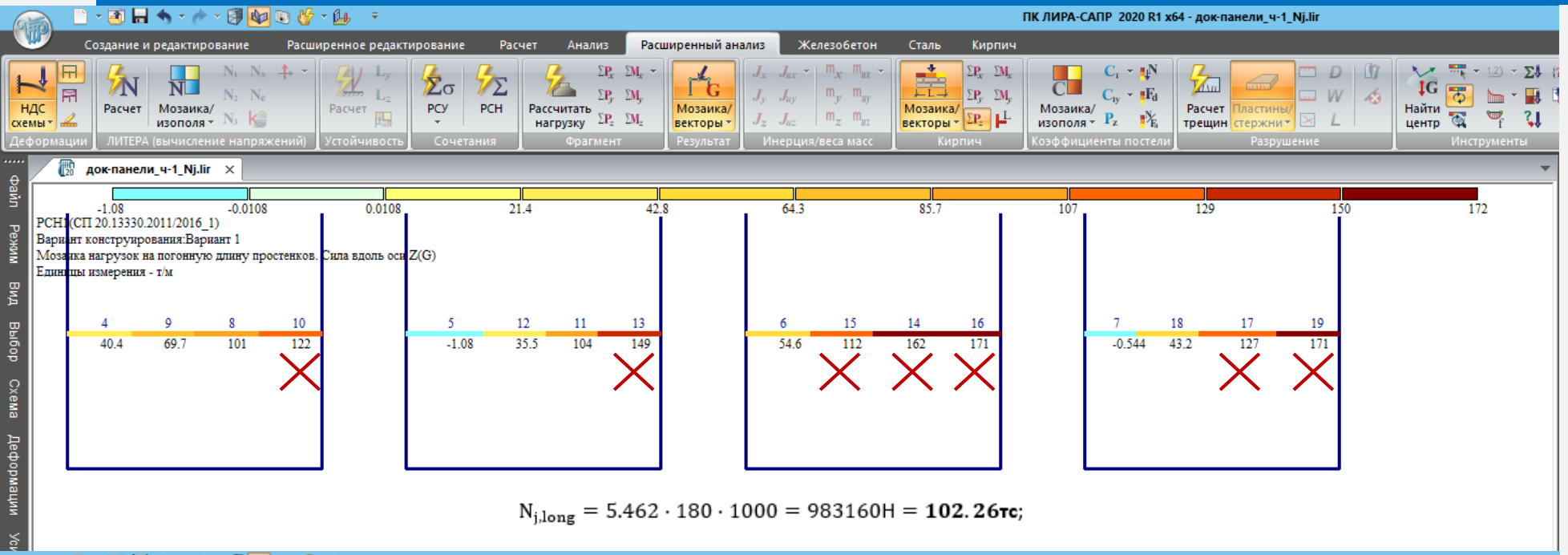
При переназначении габаритов простенков (для получения средних напряжений в стыке на ограниченном участке с учетом неравномерного сжатия по длине стеновой панели), необходимо обратить внимание на участки стыка с нулевым напряжением (растянутые) и с предельным сжатием. Поскольку такие участки объединенные вместе дадут заниженные средние значения (см. выше).

Примем размер длины простенка для осреднения нагрузок около 1.5 метра, в данном случае просто для примера (нет четких критериев каким нужно принимать этот размер, может, порядка 5 толщин стеновой панели).

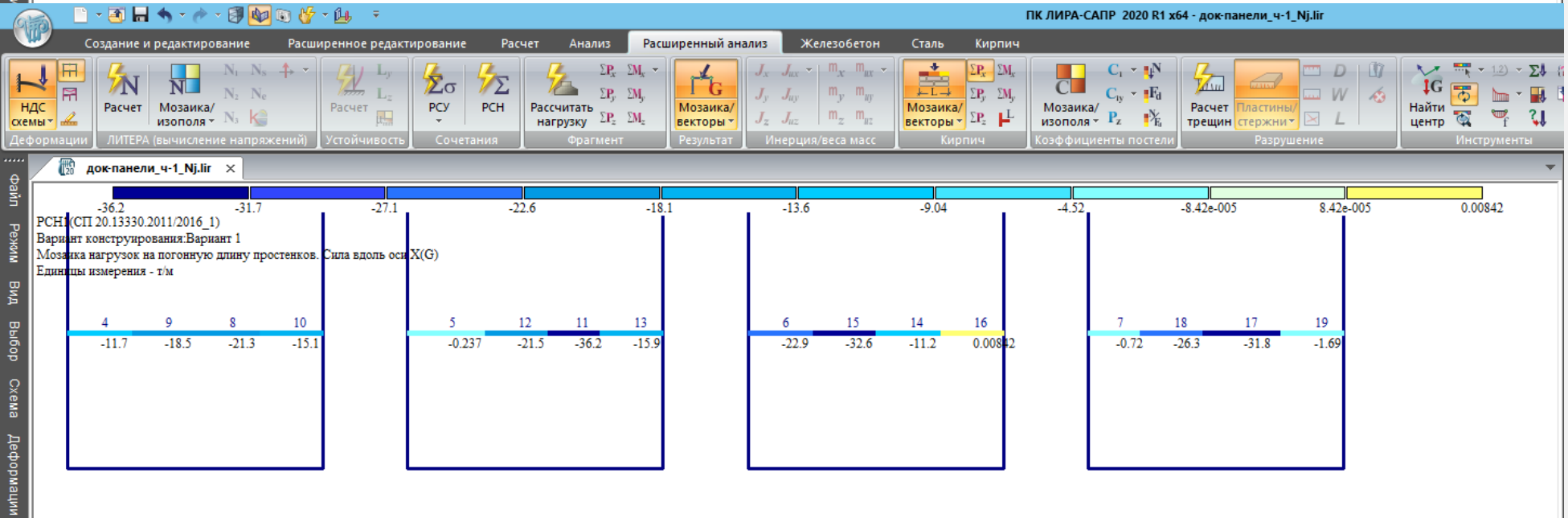
Для этого на мозаике напряжения сжатия стыка Ny выделим КЭ стыка, чередуя выделенные и невыделенные КЭ, чтобы средний размер каждой группы был близок к принятому габариту.

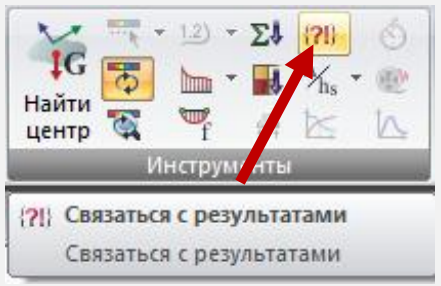
Далее возвращаемся в исходные данные и с помощью меню Уровни переназначаю группы простенков по габаритам выделенных элементов – теперь у нас уже не один простенок на стеновую панели, а несколько простенков принятого габарита (с вычетом участков с нулевым сжатием).

Проверка несущей способности на сжатие



$$N_{j,long} = 5.462 \cdot 180 \cdot 1000 = 983160H = \mathbf{102.26тс};$$





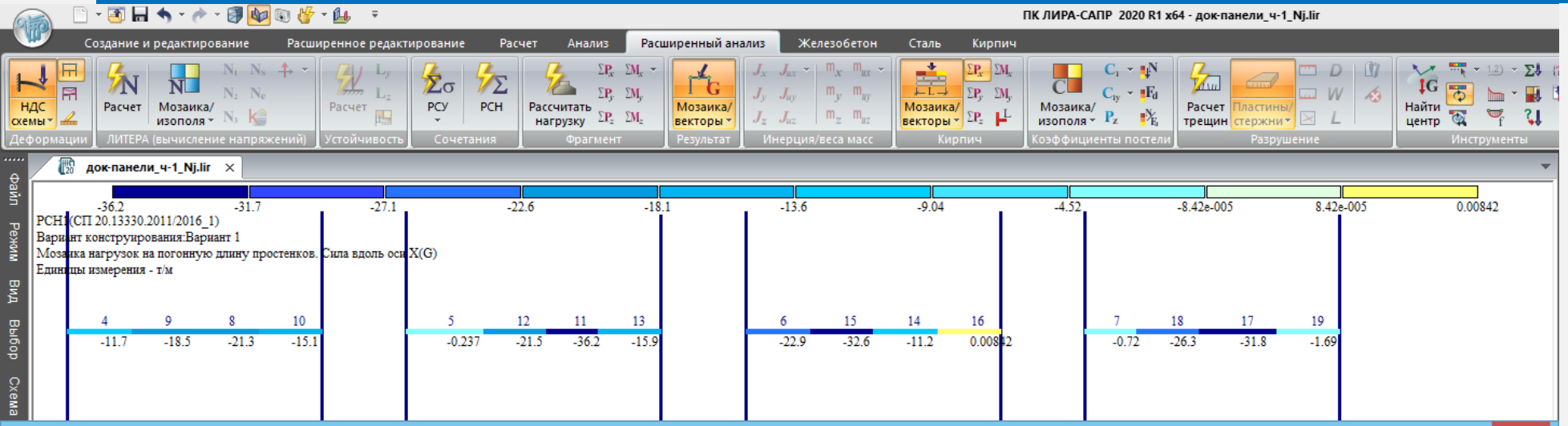
Начиная с релиза 2 версии 2019 при переназначении Групп в пределах существующего Уровня не нужно пересчитывать всю задачу, достаточно в результатах нажать кнопку «Связаться с результатами». И усилия в простенках новых габаритов будут автоматически пересчитаны.

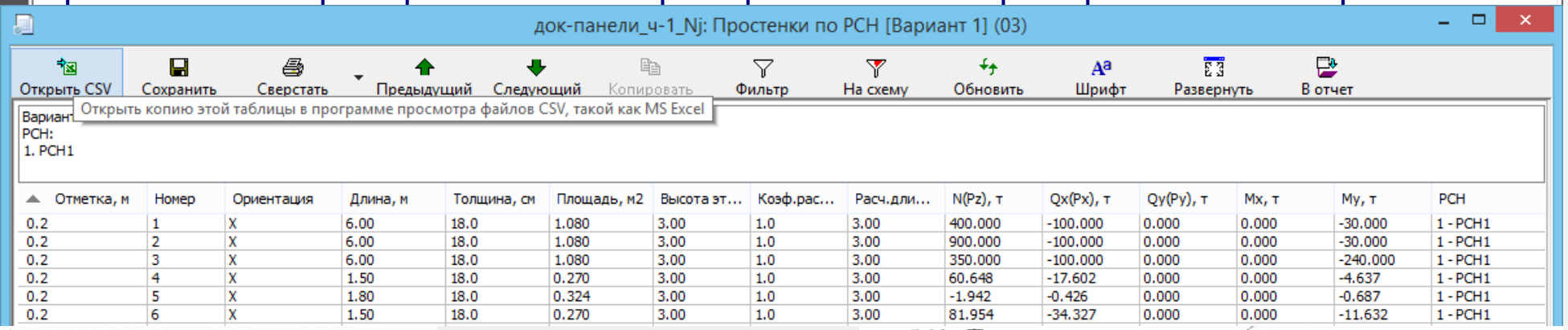
Мы видим пересчитанные погонные нагрузки, и можем легко определить те части стыка (полосы столба), в которых нагрузки не превышают предела несущей способности на сжатие, и те, в которых несущая способность не обеспечена. Если какая-то часть стыка не несет полученную нагрузку, значит придется менять конструктивное решение стыка, класс бетона стеновой панели или её толщину.

С проверкой несущей способности на сдвиг несколько сложнее, поскольку она зависит от средних сжимающих напряжений.

LIRA LAND GROUP

Проверка несущей способности на сдвиг





Отметка, м	Номер	Ориентация	Длина, м	Толщина, см	Площадь, м2	Высота эт...	Коэф.рас...	Расч.дли...	N(Pz), т	Qx(Px), т	Qy(Py), т	Mx, т	My, т	РСН
0.2	1	X	6.00	18.0	1.080	3.00	1.0	3.00	400.000	-100.000	0.000	0.000	-30.000	1 - РСН1
0.2	2	X	6.00	18.0	1.080	3.00	1.0	3.00	900.000	-100.000	0.000	0.000	-30.000	1 - РСН1
0.2	3	X	6.00	18.0	1.080	3.00	1.0	3.00	350.000	-100.000	0.000	0.000	-240.000	1 - РСН1
0.2	4	X	1.50	18.0	0.270	3.00	1.0	3.00	60.648	-17.602	0.000	0.000	-4.637	1 - РСН1
0.2	5	X	1.80	18.0	0.324	3.00	1.0	3.00	-1.942	-0.426	0.000	0.000	-0.687	1 - РСН1
0.2	6	X	1.50	18.0	0.270	3.00	1.0	3.00	81.954	-34.327	0.000	0.000	-11.632	1 - РСН1

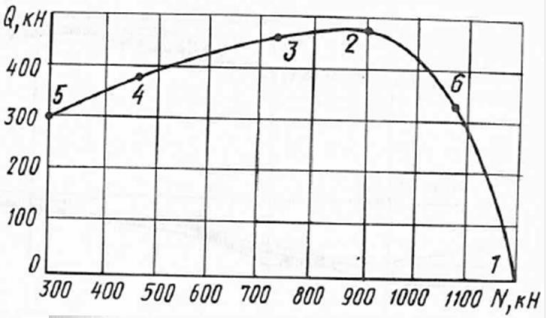
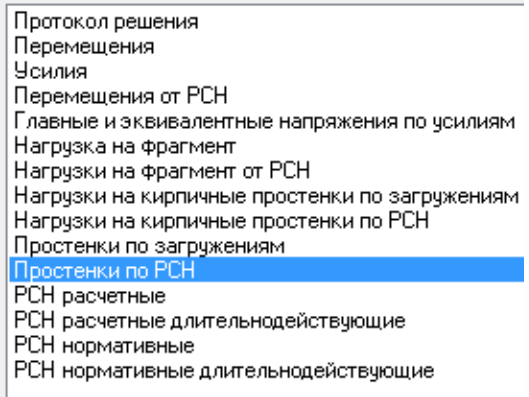


Рис. 2.32. Зависимость несущей способности при сдвиге Q от нормальной силы N



5.44. Прочность плоских горизонтальных стыков при сдвиге проверяется по формуле

$$V \leqslant (R_\tau + \eta\sigma)\, A_c, \qquad (138)$$

где R_τ — сопротивление растворного шва срезу, принимаемое для растворов марки 50 и выше, в случае, указанном в п. 5.43а равном 0,16 МПа (1,6 кгс/см²), а в случае указанном в п. 5.43б, $R_\tau = 0$;

σ — среднее напряжение сжатия в сжатой зоне горизонтального стыка;

η — коэффициент трения, принимаемый для горизонтальных стыков равным: для плоских стыков сборных элементов — 0,6; для горизонтальных технологических швов бетонирования монолитных стен, выполняемых без специальной обработки — 1;

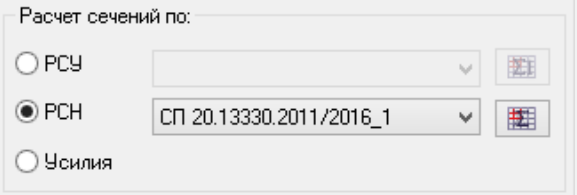
A_c — площадь сжатой зоны стыка.

С проверкой несущей способности на сдвиг несколько сложнее, поскольку она зависит от средних сжимающих напряжений.

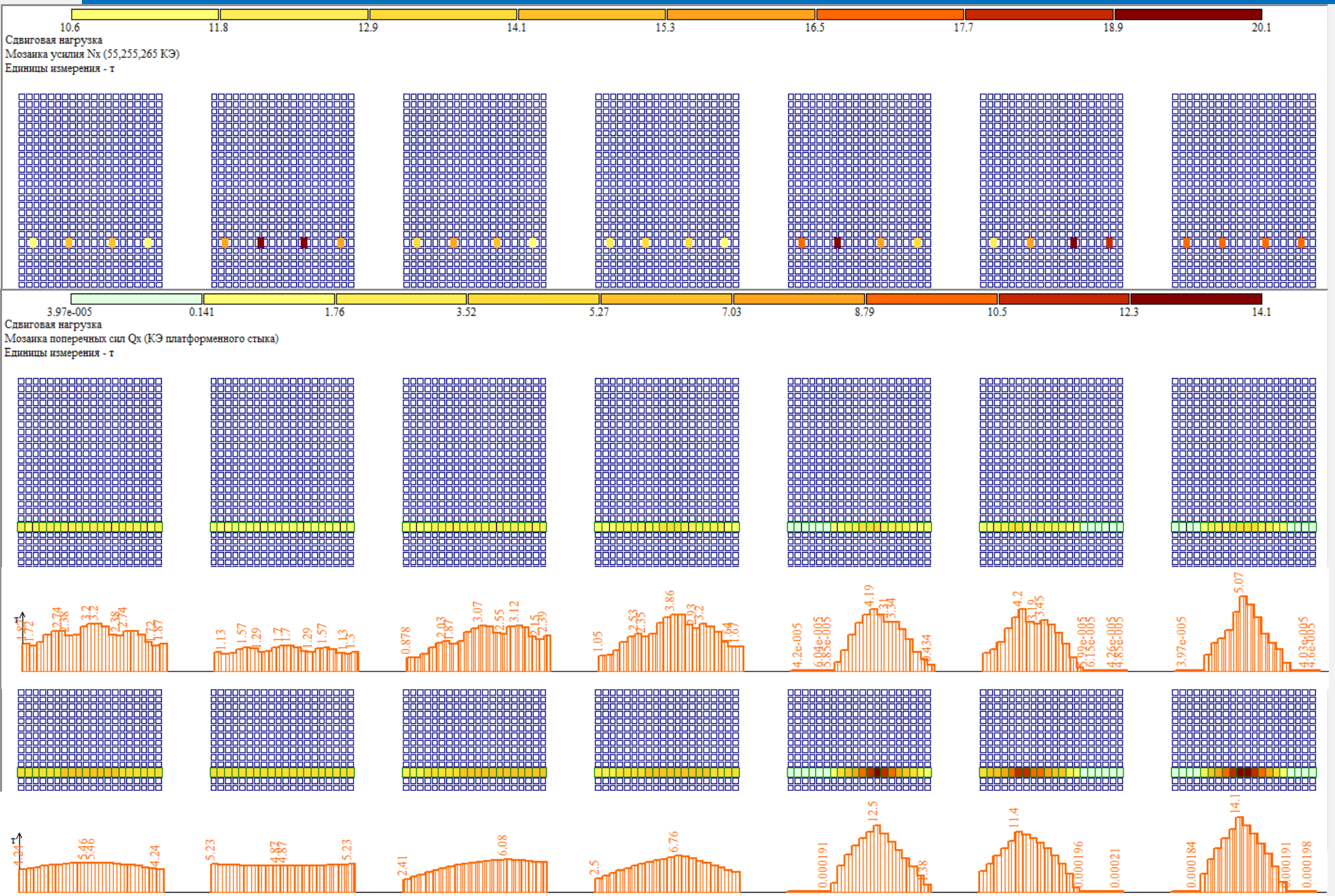
Для проверки необходимо открыть Стандартные таблицы/Простенки по РСН. И экспортировать таблицу в Excel.

В данной таблице есть площадь простенка и вертикальная нагрузка, откуда можно посчитать σ (среднее напряжение в сжатой зоне горизонтального стыка – назначенного простенка). И есть сама сдвигающая нагрузка на простенок. Достаточно добавить η (коэффициент трения) и Rτ (сопротивление растворного шва срезу), и можно сделать проверку несущей способности стыка на сдвиг по формуле 138 из Пособие по проектированию жилых зданий Вып. 3 Конструкции жилых зданий (к СНиП 2.08.01-85). М. 1989 г.

Примечание: таблица «Простенки по РСН» появится в списке, только если задать в Варианте конструирования «расчет сечений: по РСН»



Проверка несущей способности на сдвиг



Если несущая способность горизонтального стыка на сдвиг не обеспечена, то можно установить дополнительные связи, которые могут воспринимать сдвиговые нагрузки: сварные связи по закладным, бетонные армированные шпонки и т.п.

Для примера установим по длине стыка 4 связи КЭ255 с условными параметрами: работа на растяжение (по Z) с пределом 9 т, и работа на сдвиг с пределом 22 т.

Численное описание КЭ 255,...

	R (т/м)	N+ (т)	N- (т)
X	100000	22	-22
Y	0	0	-0
Z	4000	9	-0

Как видим на мозаике сдвиговых напряжений стыка с учетом дополнительных связей и без – произошла существенная разгрузка стыка.

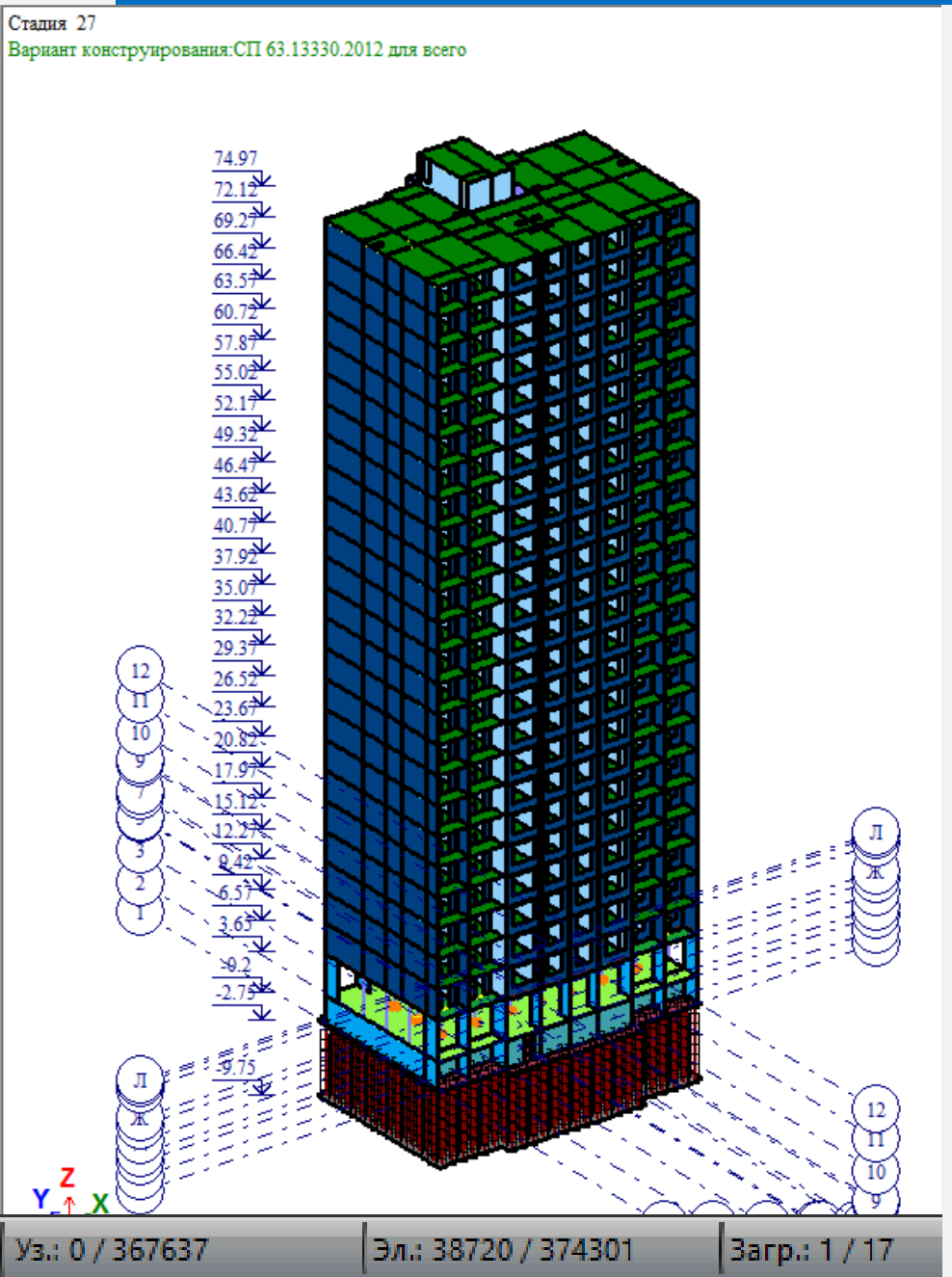
В данном случае рассматривались условные параметры. Жесткости и предел несущей способности таких связей будет сильно зависеть от их конструктивного решения.

LIRA LAND GROUP

Примеры расчета на реальных объектах

Москва, 2020

Примеры расчета на реальных объектах



Данная расчетная схема предоставлена ООО Кронверк Проект, г. Саратов.

Это 25-этажный жилой дом со встроенными помещениями общественного назначения. Фундамент здания принят в виде забивных свай и монолитного плитного ростверка. Техподполье и первый встроенный этаж запроектированы в монолитном варианте с перекрестными стенами в лифтово-лестничном блоке этажа, образующими ядро жесткости, и системой пилонов и колонн объединенных монолитными балками с плитой перекрытия, образующими стол для монтажа сборных панелей. Типовые этажи запроектированы сборными, с использованием технологии крупнопанельного домостроения.

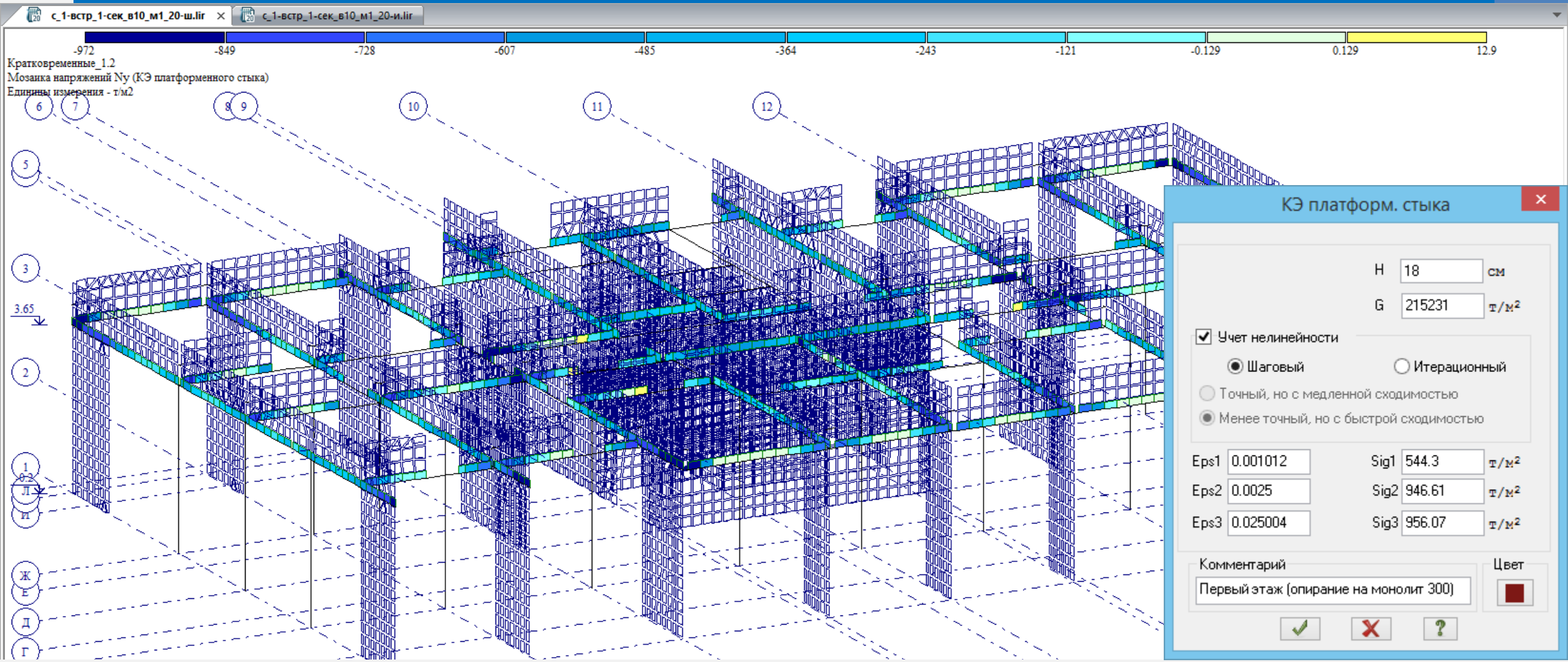
В расчетной схеме 367 637 узлов и 374 301 элементов, из них нелинейных КЭ стыка – 38 720.

Расчета произведен на компьютере:
- Intel(R) Core(TM) i7-9700 CPU @ 4.5 GHz, 8 cores, 8 threads;
- 64 Гб ОЗУ;
- Твердотельный диск 1 Тб;
- Microsoft Windows 10 Professional 64-bit.

Время расчета:
- версия 2020R1 с исходными параметрами* – 144 минуты;
- версия 2020R1 с итерационными КЭ стыка (6 загружений в 1 шаг каждое) – 78 минуты.

*исходные параметры: шаговые КЭ стыка с историей из 6 загружений разбитых в общей сложности на 34 шага с настройками по умолчанию.

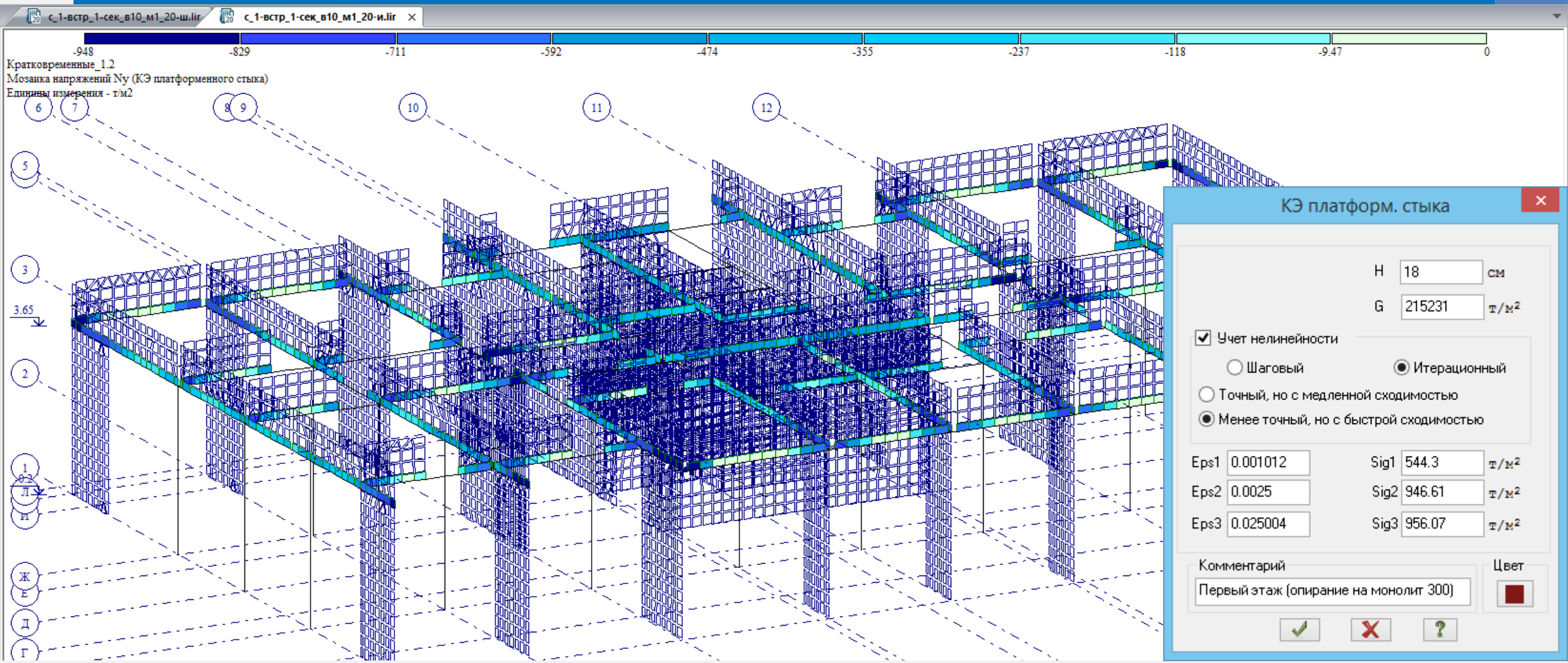
Примеры расчета на реальных объектах



Здесь показан суммарный результат для шагового расчета истории из 6ти нелинейных нагружений. Смотрим напряжения в КЭ стыка: контактный стык опирания стеновых панелей на балочную клетку переходного стола (плита перекрытия условно не показана).

Как видим, в некоторых местах локально есть ненулевое растяжение, на шкале максимально полученное напряжение 972 т/м2, хотя задано в исходных данных предельное значение 956 т/м2 (погрешность 1.6%).

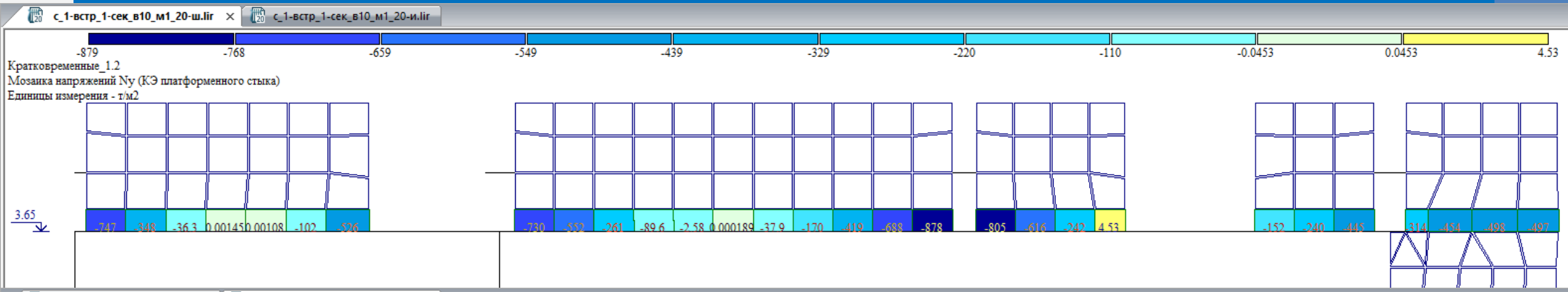
Примеры расчета на реальных объектах

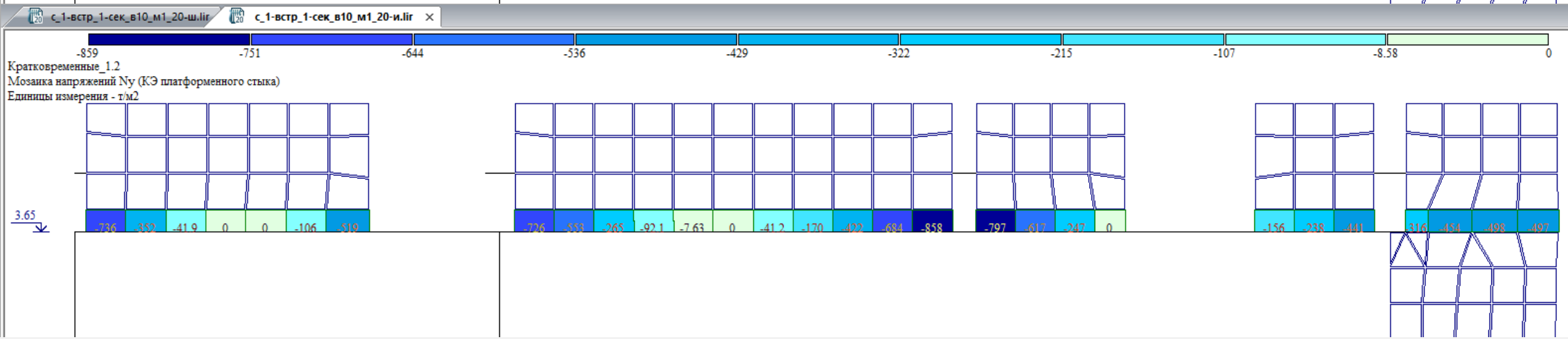


Здесь показан суммарный результат для итерационного расчета истории из 6ти нелинейных нагружений. Смотрим напряжения в КЭ стыка: контактный стык опирания стеновых панелей на балочную клетку переходного стола (плита перекрытия условно не показана).

Как видим, нет ненулевого растяжения, на шкале максимально полученное напряжение 948 т/м2, которое в пределах 3го заданного участка диаграммы (946.6-956).

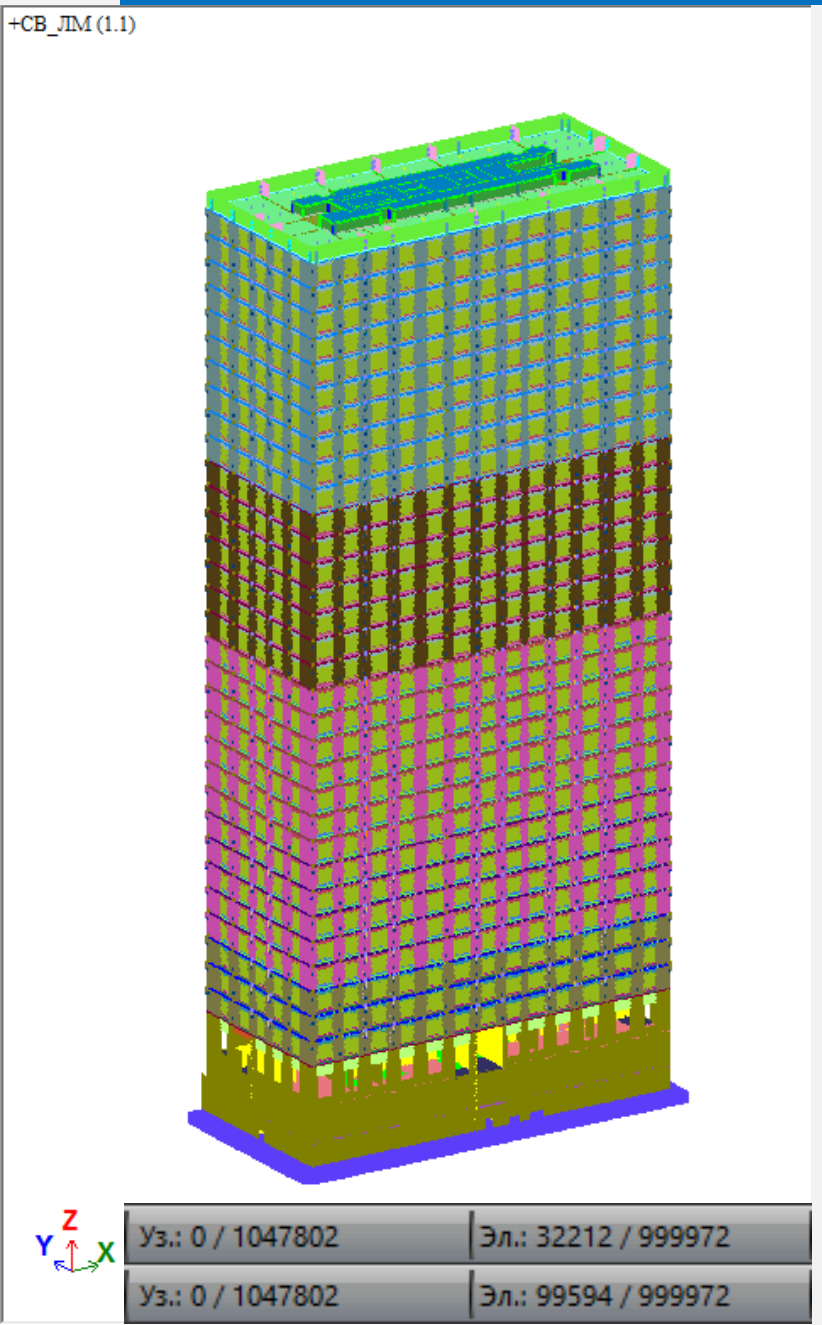
Примеры расчета на реальных объектах





Здесь показаны более детально результаты расчета по оси Д.
Как видим, результаты итерационного расчета по сравнению с шаговым расчетом несколько уточнились. Не критически, но все же.
Увеличение скорости расчета в данном случае приятный бонус.

Примеры расчета на реальных объектах



Данная расчетная схема предоставлена компанией ПИК-Проект, г. Москва.

На её примере сравним только быстродействие версий Лира-САПР 2019 и 2020 с учетом разных настроек расчета.

В расчетной схеме около 1.05 млн. узлов и около 1 млн. элементов, из них нелинейных КЭ255 – 32 212, КЭ стыка – 99 594.

Расчета произведен на компьютере:
- Intel(R) Core(TM) i7-9700 CPU @ 4.5 GHz, 8 cores, 8 threads;
- 64 Гб ОЗУ;
- Твердотельный диск 1 Тб;
- Microsoft Windows 10 Professional 64-bit.

Время расчета:
- версия 2020R1 с исходными параметрами* – 652 мин (~11 часов);
- версия 2020R1 с итерационными КЭ стыка в 1 шаг – 73 минуты.

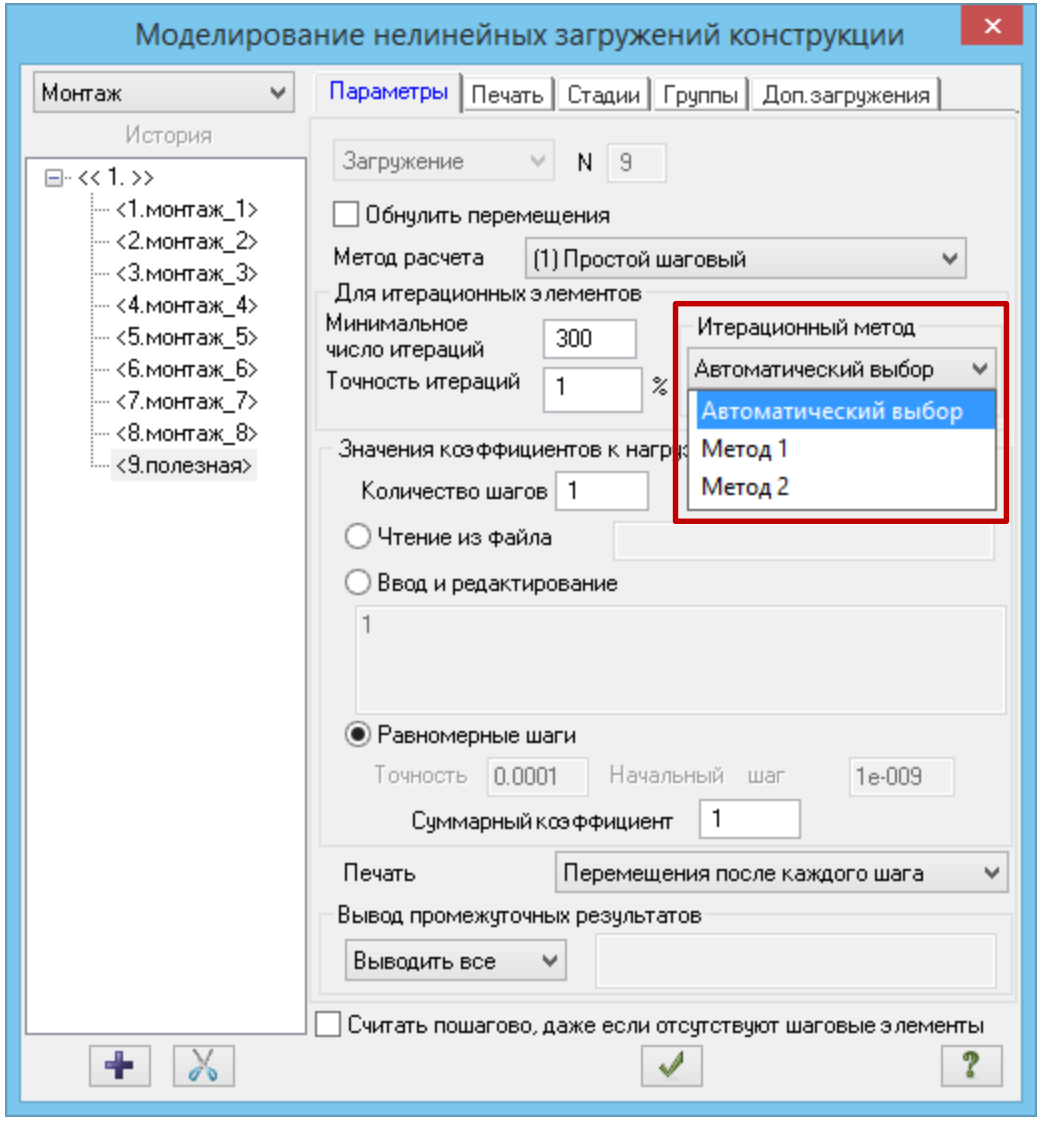
* исходные параметры: шаговые КЭ стыка в 20 шагов с настройками по умолчанию + итерационные КЭ255.

Здесь важно понимать, что с точки зрения продолжительности расчета плохо, если в схеме одновременно присутствуют и шаговые, и итерационные элементы (неважно каких типов КЭ). Если есть шаговые, значит нужно задать определенное количество шагов, и на каждом шаге будет выполняться разложение матрицы, а если есть итерационные, то на каждом шаге будут выполняться еще и итерационный расчет.

Например, есть расчетная схема с одним нелинейным нагружением. Если у нас схема с шаговыми элементами и мы задали 10 шагов, то у нас будет 10 раз выполняться разложение матрицы. Если у нас схема с итерационными элементами (соответственно задан 1 шаг), то у нас будет 1 раз выполняться разложение матрицы и 1 раз итерационный расчет. А если у нас схема и с шаговыми, и с итерационными элементами, и мы задали 10 шагов, то у нас 10 раз будет выполняться разложение матрицы и 10 раз итерационный расчет.

Поэтому в такой ситуации в протоколе расчета теперь выдается предупреждение:
«ВНИМАНИЕ!!! В схеме присутствуют как шаговые так и итерационные элементы. Время расчета будет существенно увеличено. Если есть возможность замените шаговые элементы на итерационные или наоборот.»

Метод итерационного расчета влияет на продолжительность расчета



Важное изменение, касающееся продолжительности расчета – теперь имеется возможность выбрать итерационный метод:

- Метод 1 – классический метод компенсирующих нагрузок;
- Метод 2 – модифицированный метод компенсирующих нагрузок;
- Автоматический выбор.

Метод 2 создан для ситуаций, когда компенсирующим нагрузкам надо «преодолевать» большую жесткость. Метод 1 в подобных ситуациях сходится очень долго. Ярко выраженная ситуация, когда необходимо применять метод 2 – это задачи конструктивной нелинейности, где односторонние абсолютные связи моделируются элементами односторонних связей с очень большой жесткостью.

Метод 1 чаще всего намного быстрее сходится, чем метод 2, в ситуациях , когда компенсирующим нагрузкам не надо «преодолевать» большую жесткость. Метод 1 игнорирует параметр «минимальное количество итераций», итерации выполняются пока не будет достигнута требуемая точность решения.

В методе 2 необходим параметр «минимальное количество итераций», так как для этого метода надо заранее знать сколько итераций будет выполнено. Поэтому вначале выполняется попытка №1, в которой выполняется «минимальное количество итераций». Если требуемая точность не достигнута, то количество итераций увеличивается в 2 раза, и выполняется попытка №2 и т. д., пока не будет достигнута требуемая точность. По времени выполнения одна итерация метода 2 приблизительно в 3.2 раза дольше, чем одна итерация метода 1.

Если пользователь выбрал «автоматический выбор», то вначале выполняются итерации методом 1. Если программа определяет, что скорость сходимости низкая, то итерации методом 1 завершаются и выполняются итерации методом 2. Лучше оставить «автоматический выбор», если заранее не знаете какой из методов даст лучший результат.

В версиях до 2020 был реализован только метод 2. В версии 2020 метод 2 усовершенствован, а также реализован метод 1.

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!

докладчик:

Водопьянов Роман Юрьевич

главный инженер, сопровождение ПК ЛИРА-САПР

support@rflira.ru, +7 (495) 106-16-06

www.liraland.ru

www.rflira.ru

Москва, 2020