

## Моделирование работы композитной стеновой панели в физически-линейной постановке

*А.А. Старостенко, П.И. Егоров*

*Тихоокеанский государственный университет, г. Хабаровск*

**Аннотация:** В данной работе представлены методы и выводы, полученные в результате моделирования композитной стеновой панели с деревянным каркасом и заполнителем из полистиролбетона методом конечных элементов. Выводы были сопоставлены с результатами испытаний панели в научно-исследовательской лаборатории Тихоокеанского государственного университета

**Ключевые слова:** линейный расчет, панельное строительство, малоэтажное строительство, полистиролбетон, композитная панель, моделирование.

### Введение

Технология строительства малоэтажных зданий с использованием композитных панелей данного вида только начала применяться и еще недостаточно изучена [1-3]. Эта методика отличается своей простотой выполнения, скоростью возведения и доступной стоимостью. Строительство надземной части здания возможно при любых температурах, поскольку панели доставляются на строительную площадку в полностью готовом к установке виде после достижения полистиролбетоном необходимой прочности. Обычно процесс строительства занимает один – два месяца. Учитывая растущий спрос на жилье и обусловленные рыночной стоимостью проблемы, использование композитных панелей может стать решением для многих желающих приобрести свой собственный дом.

### Цели и задачи

Цель исследования заключается в изучении работы композитных панелей в линейной постановке. Для достижения этой цели была разработана модель методом конечных элементов и проведены испытания панели.

### Описание панели

Моделируемая стеновая панель размером 3,0x1,5x0,21 м выполнена с использованием деревянного каркаса, который собирается с помощью болтов

(глухарей) из досок сечением 200x50 мм. Внутри каркаса устанавливаются горизонтальные бруски сечением 50x50 мм. Для соединения панелей между собой в теле панели размещаются закладные детали, такие как уголки и арматурные стержни, приваренные к ним. Снаружи панель обшита асбестоцементным листом толщиной 10 мм, а полость заполнена полистирольбетоном. Соединение панелей осуществляется с использованием болтов М16.

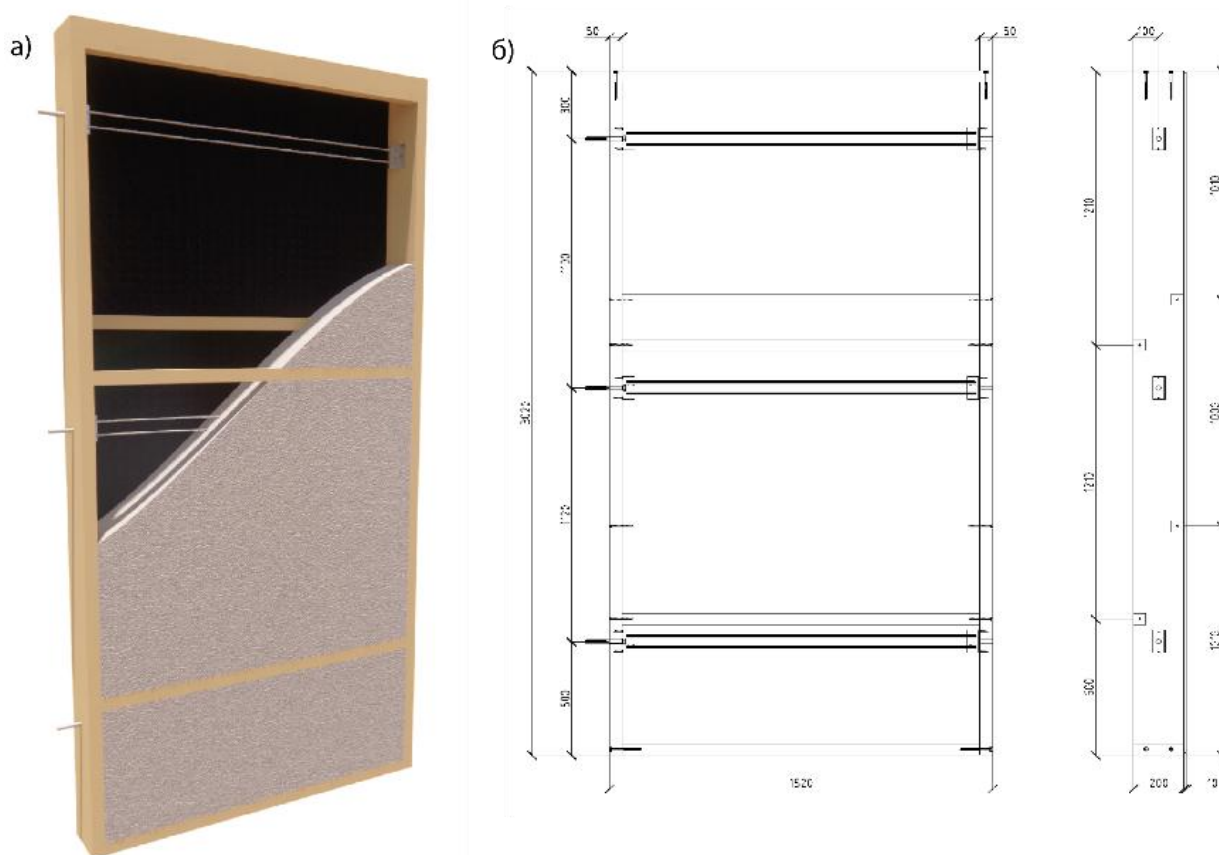


Рис. 1. – Панель: а) трехмерная модель; б) чертёж

## Описание модели

Расчетная схема и модель представлены на рис. 2.

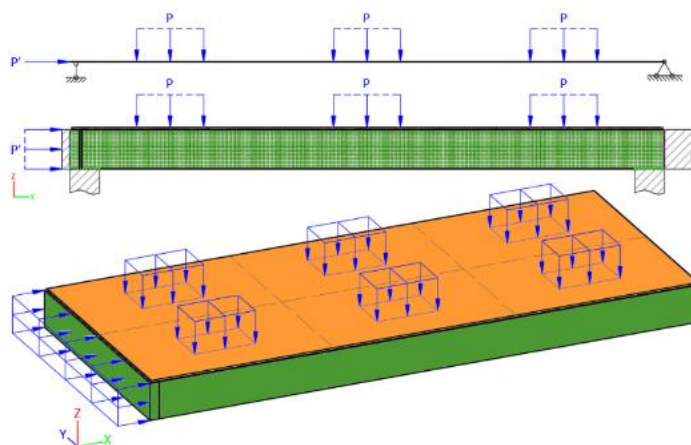


Рис. 2. - Расчетная схема; модель

При создании модели были использованы методы, в том числе, успешно применяемые ранее [4-6]:

Узел сопряжение досок 50 х 200 мм при организации рамы выполняется при помощи двух болтов (глухарей) для каждого стыка. Полученное соединение обладает податливостью. Для воспроизведения соединения применяются абсолютно жесткие тела и объединенные перемещения по осям X, Y, Z (рис. 3).

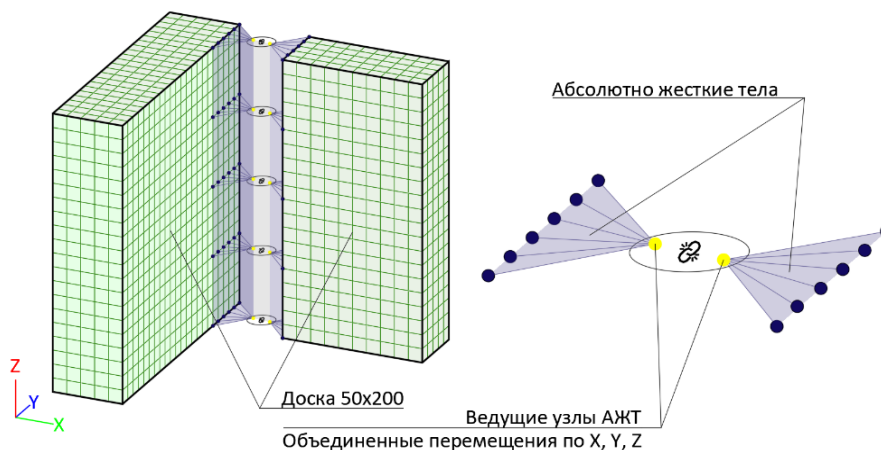


Рис. 3. - Организация сопряжения досок деревянной рамы

Узлы на каждом уровне, расположенные в плоскости  $XoY$ , объединяются в абсолютно жесткие тела, а ведущие узлы для каждой пары таких структур создают группу объединенных перемещений по всем трем осям. Такой подход позволяет создавать шарниры относительно оси  $Z$  для объемных элементов и обеспечивает более равномерное распределение напряжений в конструкции без образования участков концентрации напряжений.

Следующий метод моделирования заключается в передаче сил и напряжений от асбестоцементного листа к деревянным конструкциям и полистиролбетону (рис. 4).

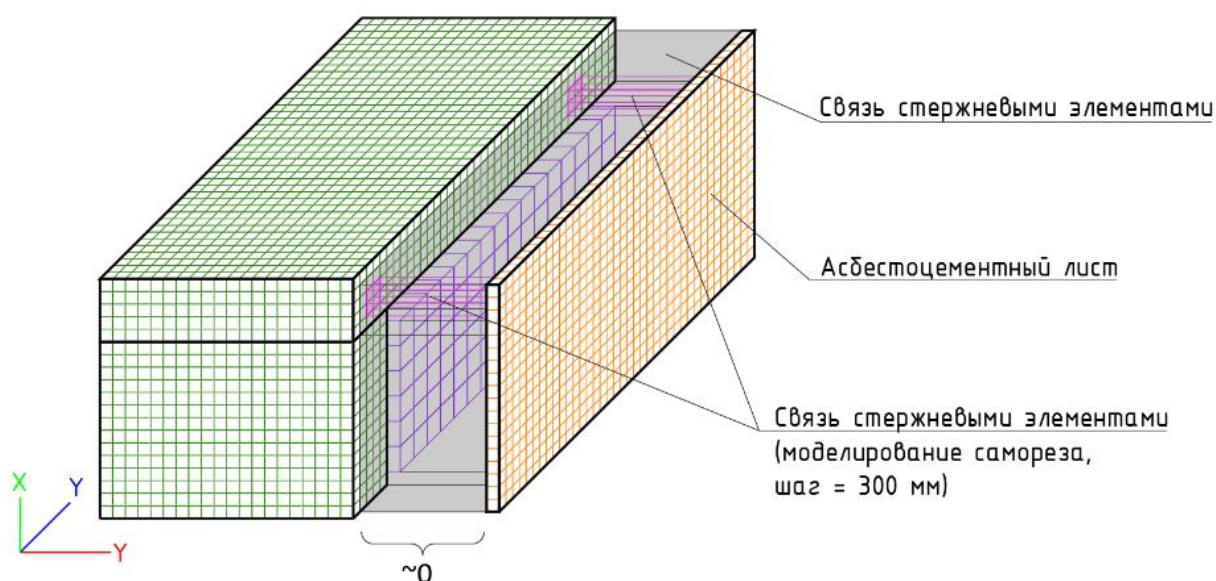


Рис. 4. - Связь материалов с асбестоцементным листом

Основная задача данного приема заключается в передаче нагрузок и напряжений именно от асбестоцементного листа к другим элементам конструкции, с минимизацией обратной связи. Предполагается взаимодействие элементов через контакт плоскостей различных материалов. Прямое объединение материалов через функцию упаковки узлов конечных

элементов может привести к некорректной работе модели из-за больших различий в жесткостных характеристиках. Поэтому применяются двухузловые стержневые элементы с длиной, близкой к нулю, обладающие правильно подобранными жесткостными характеристиками, которые работают главным образом в направлении передаваемой нагрузки и более гибко в перпендикулярном направлении. Моделирование саморезов происходит подобным образом, но модуль упругости задан на несколько порядков выше, что позволяет считать набор этих стержней абсолютно жестким телом.

Последние два метода посвящены опиранию конструкции на испытательном стенде [7] (рис. 5, 6).

Опирание панели достигается путем создания шарнирных соединений с использованием абсолютно жестких элементов с ведущими узлами в требуемых местах. Этот подход аналогичен методу соединения элементов деревянного каркаса, описанному ранее. Он продемонстрировал высокую эффективность в ходе проведения количественных исследований.

Вся модель состоит из 331569 узлов, 258145 конечных элементов.

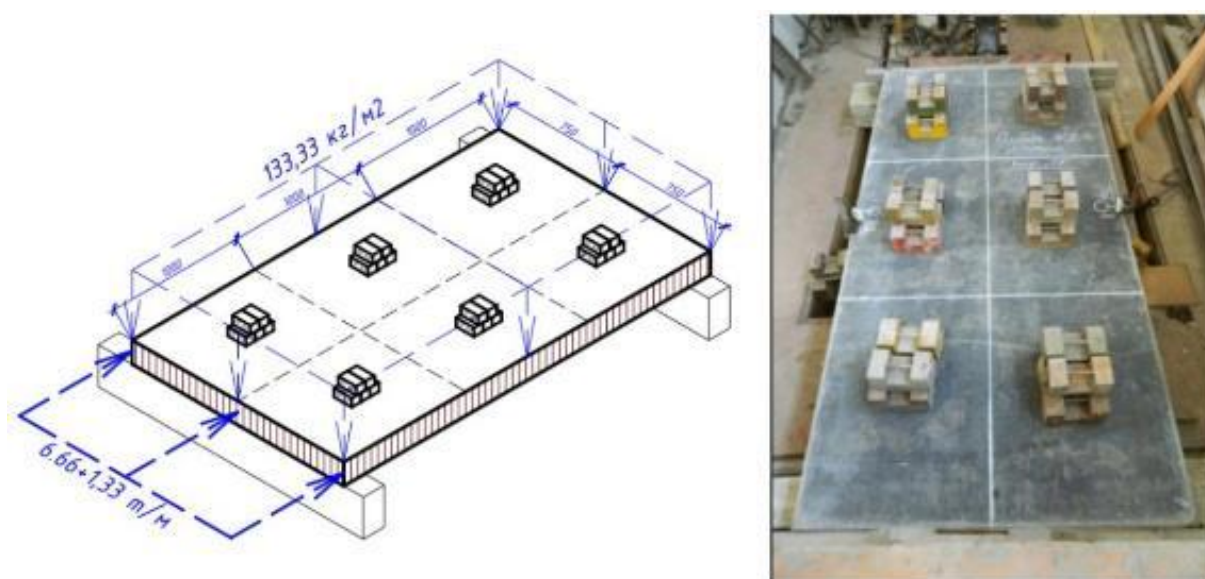


Рис. 5. - Схема испытаний конструкции



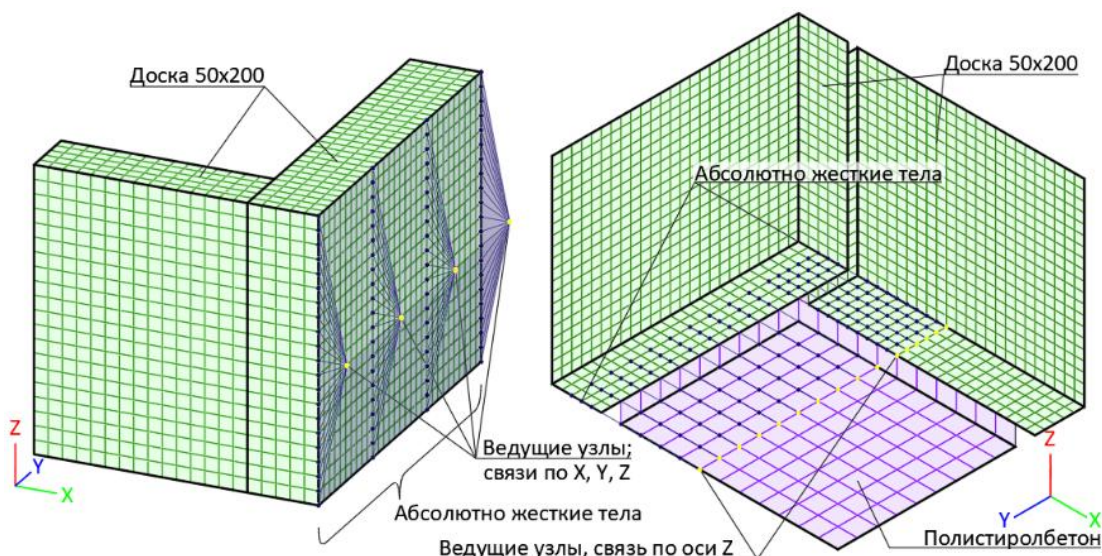


Рис. 6. - Опираение панели (граничные условия)

### Заключение

В результате рассмотрения и сопоставления вычислений при проведении моделирования панели был осуществлен шаг за шагом анализ нагрузки конструкции в соответствии с данными испытаний. Общее количество шагов составило 18 (при этом вес собственной конструкции рассматривался как шаг 0).

Важно отметить, что при использовании линейного метода моделирования композитной панели достаточно сложно обеспечить корректную работу на протяжении всех циклов нагружения. Это объясняется тем, что при достижении предельных значений напряжений в определенных элементах модели, данные элементы должны быть исключены из дальнейших расчетов. Однако этого не происходит при использовании линейного подхода, так как одним из требований при проведении расчетов является сохранение целостности всей конструкции.

На рис. 7 показаны две ключевые точки анализа:

- Местное смятие поперек волокон, произошедшее на 6-м шаге расчета (11 шаг натуральных испытаний);
- Потеря устойчивости стойки (разрушение) на 18-м шаге расчета (18 шаг натуральных испытаний).

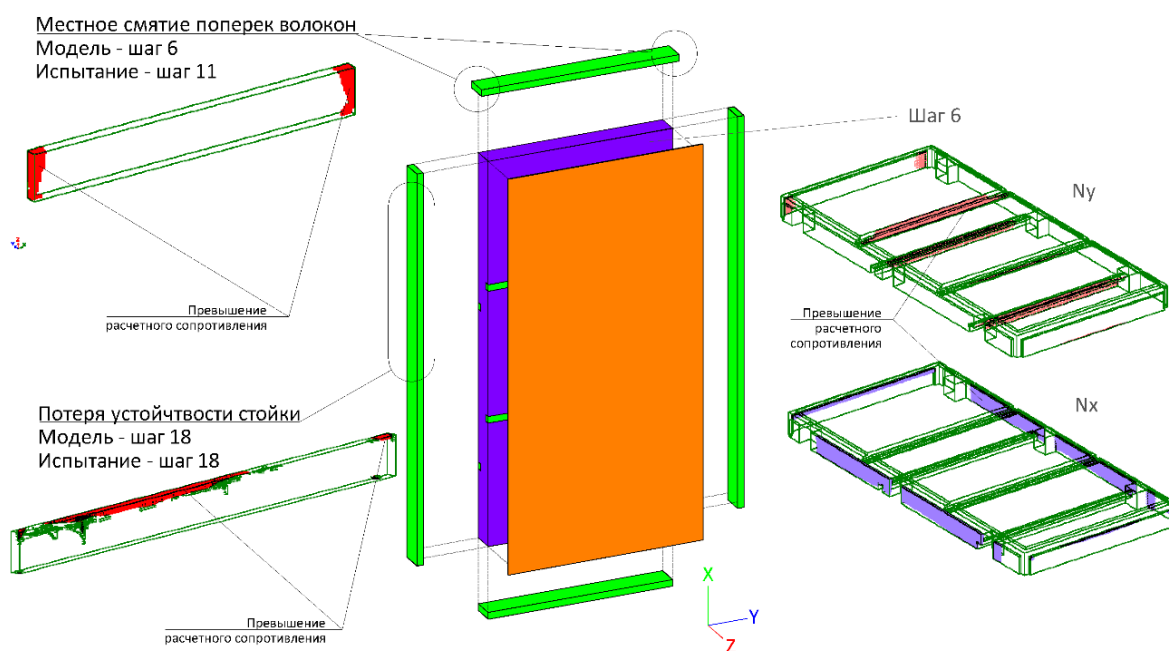


Рис. 7. - Результаты расчета

В момент смятия наблюдается значительное расхождение в результатах (48,96% от приложенной нагрузки), тогда как разрушение стойки произошло на одном и том же шаге. Причинами этого могут быть следующие факторы:

1. В расчете используются элементы, работающие линейно и на каждом шаге нагружения модели появляются новые элементы, напряжения в которых превышают предельные. На 6-ом шаге таких элементов незначительное количество, что свидетельствует о том, что они не могли значительно повлиять на расчет (на рис. 7. оранжевым ( $N_y$ ) и фиолетовым ( $N_x$ ) цветами выделены элементы полистиролбетона с превышением предельных напряжений на 6-ом шаге расчета).

2. Обработка результатов расчета проводилась согласно СП 64.13330 – Деревянные конструкции. При определении расчётных сопротивлений древесины применяются понижающие коэффициенты условий работы и длительной прочности (для данного расчета произведение коэффициентов равно 0,594, что соответствует понижению расчетного сопротивления древесины на 40,6%).

При сравнении результатов линейного и нелинейного расчетов панели [8-10] можно найти подтверждение данным выводам. На рис. 8, 9 представлены напряжения  $N_y$  (вдоль деревянной стойки) для линейной и нелинейной задач соответственно. Темно-синий цвет (интервал  $-1.16e+004$  —  $-1.16e+004$ ) – предельные напряжения на сжатие; красный – напряжения выше предельно допустимых.

На этих рисунках отчетливо видна схожая картина напряжений  $N_y$  на первых этапах нагружения конструкции, когда полистиролбетон работает совместно и/или количество элементов, превысивших предельные напряжения (для линейной задачи) незначительно. С каждым дальнейшим шагом нагружения, увеличивается расхождение между нелинейной и линейной задачами. При этом и местное смятие поперек волокон и разрушение стойки в нелинейной задаче происходит сопоставимо раньше, чем при натурных испытаниях за счет использования понижающих коэффициентов.

Принимая во внимание эти замечания, можно сделать вывод, что результаты расчета достоверны, сопоставимы с натурными испытаниями, а линейная модель работает корректно до местного смятия поперек волокон ригеля панели.



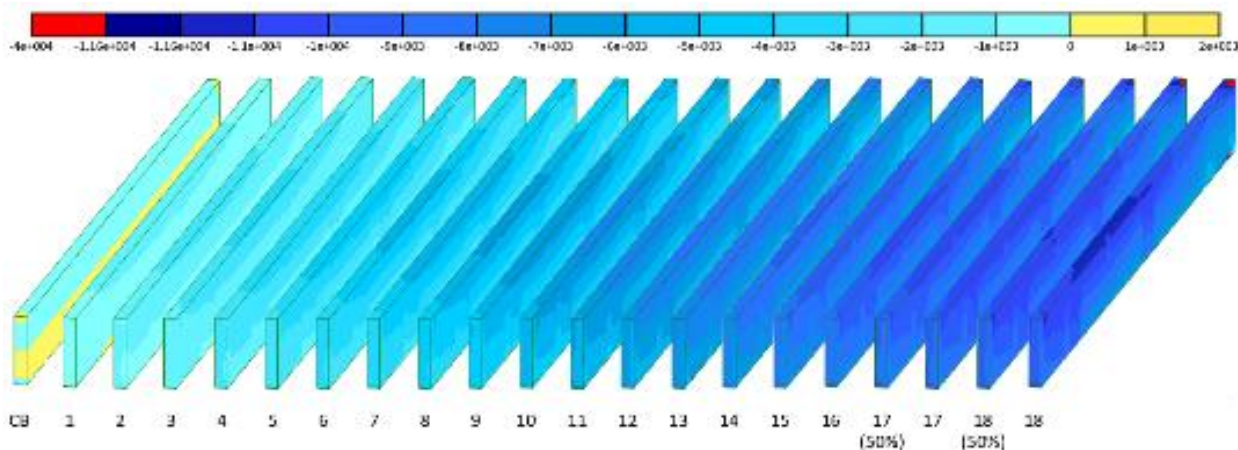


Рис. 8. - Напряжения  $N_u$  в деревянной стойке для каждого шага нагружения для модели в линейной постановке

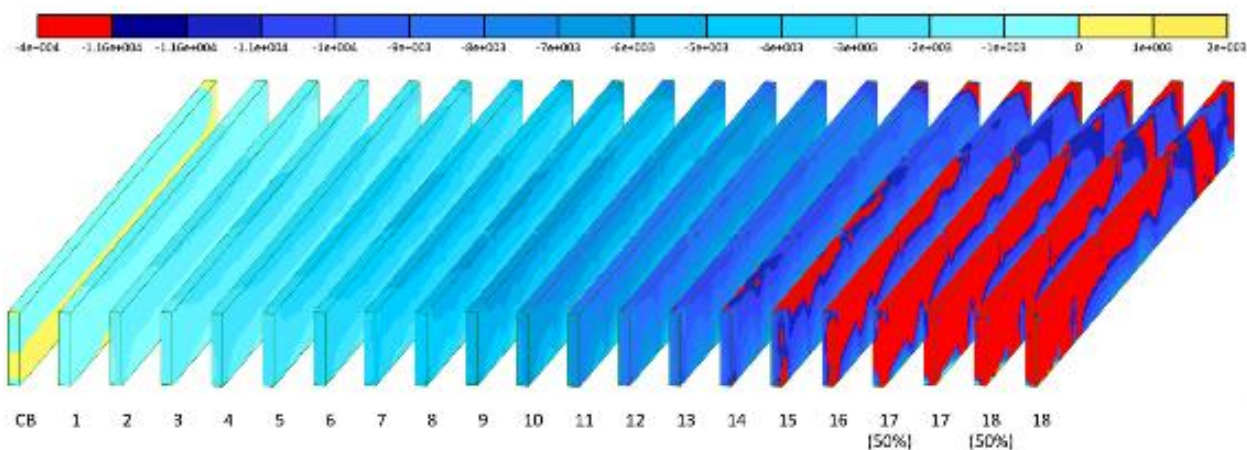


Рис. 9. - Напряжения  $N_u$  в деревянной стойке для каждого шага нагружения для модели в нелинейной постановке

Для увеличения достоверности результатов целесообразно сочетать оба подхода при моделировании зданий из композитных панелей. При таком подходе модель здания формируется в линейной постановке, что позволяет использовать суперэлементное моделирование. Далее усилия наиболее нагруженных панелей поочередно прикладываются к одиночной нелинейной панели. Это позволяет экономить время проектирования и расчета, получая точные результаты.

## Литература

1. Ajaya K. Gupta, George P. Kuo Behavior of Wood – Framed Shear Walls // Journal of Structural Engineering. vol. 111 NO. 8 AUG 1985 URL: [ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1985\)111%3A8\(1722\)](https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/(ASCE)0733-9445(1985)111%3A8(1722)).
  2. Черных А.Г., Черных А.С., Коваль П.С., Григорьев К.С. Прочность и жесткость стеновых панелей на деревянном каркасе // Современные проблемы науки и образования. 2012. №3. URL: [science-education.ru/ru/article/view?id=6527](http://science-education.ru/ru/article/view?id=6527).
  3. Кавелин А.С. Современное положение вопроса расчета нагельных соединений в деревянных стеновых панелях // Инженерный вестник Дона. 2018. №2. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/N2y2018/4890](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/N2y2018/4890).
  4. Ноновалов М.А., Козинец Г.Л. Алгоритм разработки расчетной модели деревянного многоэтажного здания // Вестник МГСУ. 2022. №4. С. 463-475.
  5. Кавелин А.С. Изучение работы панели из дерева при действии сдвиговой нагрузки // Инженерный вестник Дона. 2018. №2. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/N2y2018/4850](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/N2y2018/4850).
  6. Гуськов И.М. Эксплуатация деревянных конструкций. – М.: МИСИ им. В.В. Куйбышева, 1982. 101с.
  7. Отчет по научно – исследовательской работе на тему: «Экспериментальное исследование стеновых панелей СТП-30» - ТОГУ. Хабаровск 2014 – 20 с.
  8. Иванов В.А., Клименко В.З. Конструкции из дерева и пластмасс. Киев: Вища школа, 1983. 279 с.
  9. Cockrell, R.A. A Study of the Screw-holding Properties of Wood. Technical Bulletin 44, New York State College of Forestry. 1933. 45 p.
  10. Сапожников П.В., Кузнецов В.В., Никулин В.С. Аналитическое представление и расчет полужестких узлов при наличии частичного
-

ограничения возможного поворота угла // Инженерный вестник Дона. 2024. №2. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2024/9012](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2024/9012).

### References

1. Ajaya K. Gupta, George P. Journal of Structural Engineering. 1985, №8. URL: [ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1985\)111%3A8\(1722\)](http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/(ASCE)0733-9445(1985)111%3A8(1722)).
2. Chernykh A.G., Chernykh A.S., Koval' P.S., Grigor'yev K.S. Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya. 2012. №3. URL: [science-education.ru/ru/article/view?id=6527](http://science-education.ru/ru/article/view?id=6527).
3. Kavelin A.S. Inzhenernyj vestnik Dona. 2018. №2. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/N2y2018/4890](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/N2y2018/4890).  
Dona. 2024. №2 URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2024/9012](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2024/9012).
4. Nonovalov M.A., Kozinets G.L. Vestnik MGSU. 2022. №4. pp. 463-475.
5. Kavelin A.S. Inzhenernyj vestnik Dona. 2018. №2 URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/N2y2018/4850](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/N2y2018/4850).
6. Gus'kov I.M. Eksploatatsiya derevyannykh konstruktsiy [Operation of wooden structures]. Moskva: MISI im. V.V. Kuybysheva, 1982. 101p.
7. Otchet po nauchno - issledovatel'skoy rabote na temu: «Eksperimental'noye issledovaniye stenovykh paneley STP-30» [Research paper on the topic: "Experimental study of STP-30 wall panels"]. TOGU. Khabarovsk, 2014. 20 p.
8. Ivanov V.A., Klimenko V.Z. Konstruktsii iz dereva i plastmass. [Structures made of wood and plastics]. Kiyev: Vishcha shkola, 1983. 279 p.
9. Cockrell, R.A. A Study of the Screwholding Properties of Wood. Technical Bulletin 44, New York State College of Forestry, 1933. 45 p.
10. Sapozhnikov P.V., Kuznetsov V.V., Nikulin V.S. Inzhenernyj vestnik Dona, 2024. №2. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2024/9012](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2024/9012).

**Дата поступления: 2.05.2024**

**Дата публикации: 19.06.2024**

---