DOI https://doi.org/10.46845/2541-8254-2026-4(56)-103-103
УДК 624.074.4



РАСЧЕТ МНОГОСЛОЙНЫХ СТЕКЛЯННЫХ ПЛАСТИН В CAE FIDESYS

А. А. Шилова, студентка
E-mail: alex_shilova@inbox.ru
ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет»

В. Р. Синюкова, студентка
E-mail: alex_shilova@inbox.ru
ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет»

А. С. Лаврова, канд. техн. наук
E-mail: anna.lavrova@klgtu.ru
ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет»

В статье представлены результаты численного моделирования многослойных стеклянных пластин в отечественном программном комплексе CAE Fidesys. Рассмотрены два подхода к конечно-элементному моделированию: с использованием объёмных твердотельных конечных элементов и с применением многослойных оболочек. Проведён анализ сходимости решения для двух-, трёх- и пятислойных пластин. Установлено, что моделирование объёмными элементами даёт большие значения прогибов по сравнению с оболочечными, при этом уменьшение размера сетки существенно увеличивает время расчёта. Даны рекомендации по выбору способа моделирования конструкций из многослойного стекла для получения достоверных результатов.

Ключевые слова: *многослойное стекло, метод конечных элементов, CAE Fidesys, объёмные конечные элементы, пластинчатые конечные элементы, модель Муни – Ривлина, поливинилбутираль (ПВБ), прогиб, сходимость решения.*

ВВЕДЕНИЕ

При строительстве зданий и сооружений все чаще применяются конструкции из многослойного стекла, что позволяет достичь архитектурной выразительности в современных зданиях [1]. Однако при проектировании светопрозрачных конструкций зачастую возникают сложности, связанные с разнообразием видов конструкционного стекла и методикой расчета таких конструкций. Расчет конструкций из многослойного стекла с помощью метода конечных элементов представляется актуальным.

В данном исследовании моделирование и численный расчет пластины из многослойного стекла выполнялись в отечественном программном комплексе CAE Fidesys, предназначенном для инженерного анализа прочности [2].

Существует несколько подходов к моделированию конструкций из многослойного стекла [3]. Наиболее распространенным методом является моделирование многослойного стекла [4] с помощью объемных конечных элементов (КЭ). Однако такой расчет занимает значительное количество времени. В программном комплексе CAE Fidesys для моделирова-

ния многослойных оболочек существует специальный инструмент, позволяющий моделировать многослойные конструкции, используя пластинчатые КЭ.

В нашем исследовании мы рассмотрели оба способа моделирования: в первом – слои стекла и промежуточные слои клея моделировались с использованием объемных твердотельных КЭ [5], а во втором – с помощью многослойной оболочки [6].

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследования в данной работе является многослойная стеклянная пластина размером 1×1 м с различным количеством слоев флоат-стекла, толщиной 10 мм, соединённых между собой слоем поливинилбутираля (ПВБ). Толщина каждого слоя ПВБ составила 1,52 мм.

Предметом исследования является напряжённо-деформированное состояние многослойной стеклянной пластины, полученное двумя способами конечно-элементного моделирования в CAE Fidesys: объёмными твердотельными элементами и многослойными оболочечными элементами.

ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Целью работы являлось сравнение точности и вычислительной эффективности двух подходов к моделированию многослойных стеклянных пластин в CAE Fidesys (объёмные КЭ и многослойные оболочки) и определение рекомендуемого способа для инженерных расчётов.

Задачи исследования включали в себя:

1. Построить конечно-элементные модели двух-, трёх- и пятислойных стеклянных пластин с использованием объёмных твердотельных КЭ и с помощью многослойных оболочек.
2. Провести анализ сходимости численного решения при различных размерах конечных элементов.
3. Сравнить значения максимальных вертикальных перемещений (прогибов) для каждого способа моделирования многослойного стекла с различным количеством слоев.
4. Оценить влияние густоты сетки конечных элементов на время счёта.
5. Разработать рекомендации по выбору способа моделирования для практических задач.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

При проведении исследования применялся метод численного моделирования, количественный и качественный анализы.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В ходе исследования численное моделирование стеклянной пластины велось двумя способами. Первый способ предполагал моделирование слоев стекла и промежуточных слоев из ПВБ с использованием объемных твердотельных КЭ (рисунок 1), второй – с помощью многослойной оболочки (рисунок 2).

Рассматриваемая модель имела размеры 1×1 м. Толщина каждого слоя флоат-стекла составляла 10 мм. Толщина промежуточных слоев из ПВБ – 1,52 мм. Нами рассматривались двух-, трех- и пятислойные стеклянные пластины, общая толщина которых составила 21,52, 33,04, и 56,08 мм соответственно.

На кромках модели поступательные и вращательные степени свободы всех узлов были заданы равными нулю, что соответствует жесткому защемлению контура пластины.

Пластина нагружалась равномерно распределенной нагрузкой.

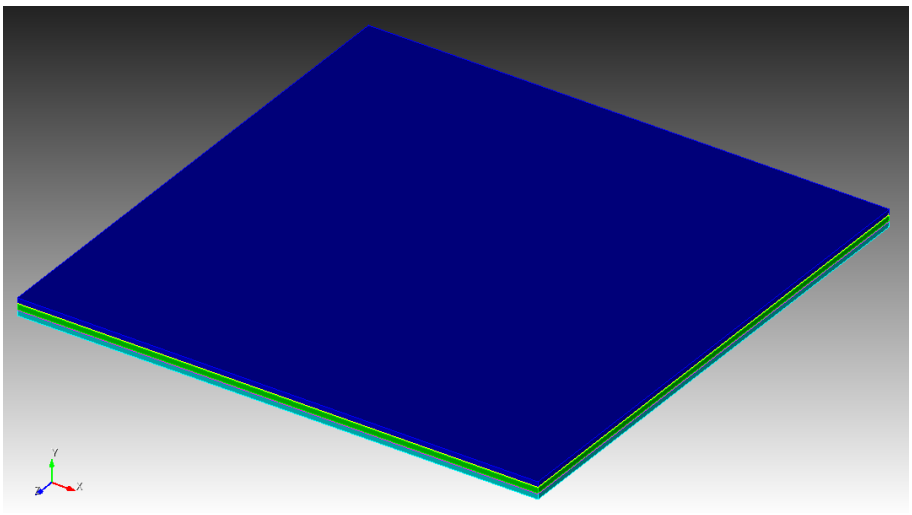


Рисунок 1 – Модель трехслойной стеклянной пластины с в ПК CAE Fidesys, выполненная с использованием объемных твердотельных КЭ (сетка КЭ не показана)

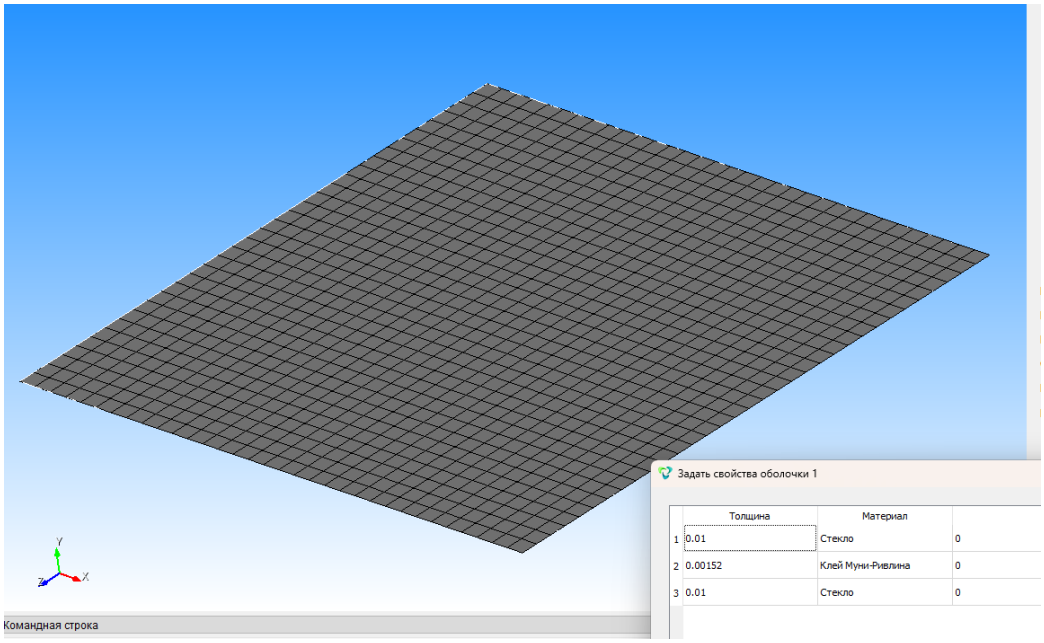


Рисунок 2 – Модель трехслойной стеклянной пластины с в ПК CAE Fidesys, выполненная с использованием многослойной оболочки

Материал стекла считается полностью упругим и подчиняется закону Гука. Модуль Юнга и коэффициент Пуассона стекла приняты по данным производителя и равны 65 000 МПа и 0,23 соответственно. Плотность стекла задана равной 2500 кг/м³. Промежуточные слои ПВБ являются вязкоупругими, поскольку они имеют разные свойства при разных температурах и длительности воздействия нагрузки. При моделировании для промежуточного слоя использовалась модель материала Муни – Ривлина. Плотность пленки из ПВБ принята 950 кг/м³. При моделировании предполагалось, что связь между слоями стекла и промежуточными слоями ПВБ идеальна, без отслоения. На рисунке 3, а, б, показаны свойства материалов, используемые при моделировании.

Свойства | Напряжения/деформации

Свойства материала	Значение
Стекло	
Материал Гука	
Модуль Юнга	65000
Коэффициент Пуассона	0.23
Общие	
Плотность	2.5e-09

а)

Свойства | Напряжения/деформации

Свойства материала	Значение
Клей Муни-Ривлина	
Материал Муни-Ривлина	
Коэффициент C10	1.6
Коэффициент C01	0.06
Коэффициент D	0.012
Общие	
Плотность	1e-09

б)

Рисунок 3 – Свойства материалов, принятые при моделировании в ПК CAE Fidesys
а) флоат-стекло; б) поливинилбутираль (ПВБ)

В ходе моделирования многослойной стеклянной пластины помимо исследования способов моделирования проводился анализ сходимости решения [8]. По результатам проведенного анализа достаточная сходимость была достигнута при размерах КЭ 13,5 мм для всех рассматриваемых многослойных стеклянных пластин, т. е. двух-, трех- и пятислойного стекла. Дальнейшие уменьшение КЭ не оказало существенного влияния на результат расчета – вертикальные перемещения и эквивалентные напряжения. Фрагмент сгенерированной сетки трехслойной стеклянной пластины показан на рисунке 4.

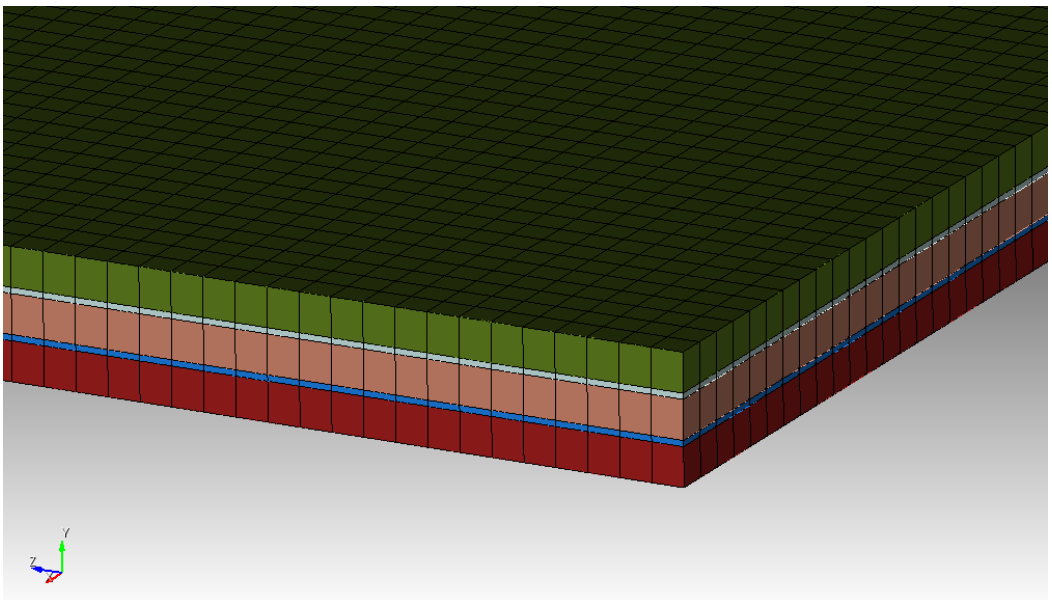


Рисунок 4 – Фрагмент сгенерированной сетки трехслойной стеклянной пластины в ПК CAE Fidesys

По результатам численного расчета пластин из многослойного стекла были построены графики вертикальных перемещений для каждого рассмотренного случая, в зависимости от размера конечного элемента.

На рисунке 5 показан график для пятислойной стеклянной пластины.

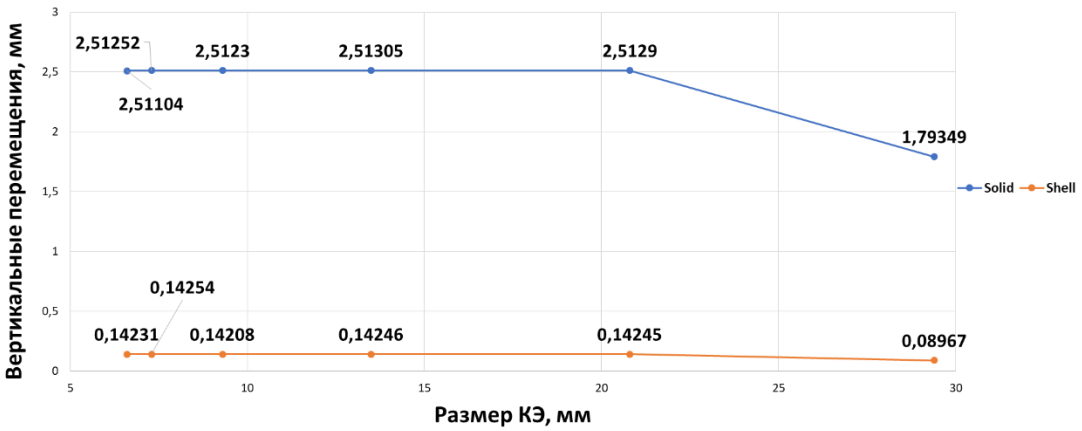
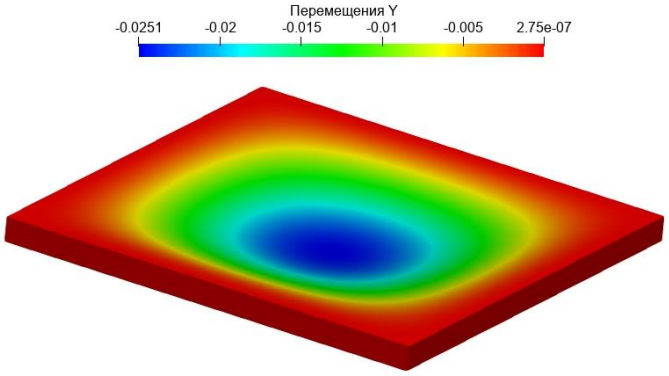


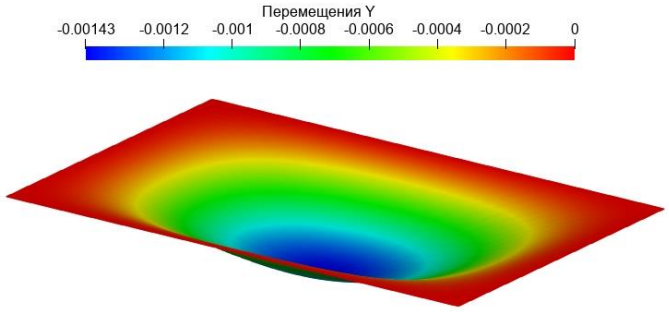
Рисунок 5 – Вертикальные перемещения пятислойной стеклянной пластины

Графики, построенные для моделей пластин из двух- и трехслойного стекла, имеют аналогичное очертание. Как видно из графика, способ моделирования многослойного стекла с помощью объемных конечных элементов показал большие значения вертикальных перемещений, чем моделирование с помощью пластинчатых КЭ.

На рисунке 6, а, б, показана схема деформирования пятислойного стекла в зависимости от способа моделирования.



а)



б)

Рисунок 6 – Вертикальные перемещения пятислойной стеклянной пластины:
а) моделирование с использованием объемных твердотельных КЭ; б) моделирование с использованием многослойной оболочки

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам исследования можно сделать следующие выводы:

1. Проведенные исследования подтвердили возможность моделирования несущих конструкций из многослойного стекла в программном комплексе CAE Fidesys.

2. Для получения достоверных данных по величине прогибов конструкций из многослойного стекла следует использовать при моделировании объемные конечные элементы. Особое внимание следует уделить моделированию клея. Однако следует провести дополнительные исследования, включая натурные испытания.

3. Проведенный анализ полученных результатов показал, что достаточная сходимость численного решения была достигнута при размерах КЭ 13,5 мм. При дальнейшем уменьшении сетки величина прогиба изменялась в пределах 1 %.

4. Уменьшении размера КЭ существенно увеличивает время вычислений (в 2,98 раза).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зенкевич, О. Метод конечных элементов в технике / О. Зенкевич. – Москва: Мир, 1975. – 544 с.

2. Басов, К. А. ANSYS в примерах и задачах / К. А. Басов. – Москва: ДМК Пресс, 2016. – 272 с.

3. Потапов, В. Д. Расчёт многослойных пластин и оболочек из композиционных материалов / В. Д. Потапов, А. В. Тарасов, Е. С. Козлов. – Санкт-Петербург: СПбГАСУ, 2019. – 124 с.

4. Шереметьева, М. А. Моделирование вязкоупругого поведения поливинилбутиральной плёнки в стеклопакетах / М. А. Шереметьева, И. И. Соколов // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. – 2020. – № 5. – С. 57–64.

5. Руководство пользователя CAE Fidesys. Версия 4.2. – Москва: ООО «ФИДЕСИС», 2021. – 410 с.

6. ГОСТ 33000-2014. Стекло с защитным многослойным покрытием. Технические условия. – Москва: Стандартинформ, 2015. – 12 с.

7. Bennison, S. J. High-performance laminated glass for structural glazing / S. J. Bennison, M. H. Qin, P. S. Davies // Glass Processing Days. – 2009. – P. 132–138.

8. Пименов, В. А. Исследование напряженно-деформированного состояния многослойных стеклянных ребер светопрозрачных фасадных конструкций / В. А. Пименов, А. С. Лаврова // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. – 2026. – № 2. – С. 46–58. – DOI 10.37153/2618-9283-2026-2-46-58.

CALCULATION OF MULTILAYER GLASS PLATES IN CAE FIDESYS

A. A. Shilova, student
E-mail: alex_shilova@inbox.ru
Kaliningrad State Technical University

V. R. Sinyukova, student
E-mail: alex_shilova@inbox.ru
Kaliningrad State Technical University

A. S. Lavrova, Candidate of Technical Sciences
E-mail: anna.lavrova@klgtu.ru
Kaliningrad State Technical University

The article presents the results of numerical modeling of multilayer glass plates in the CAE Fidesys software package. Two approaches to finite element modeling have been considered: using volumetric solid finite elements and using multilayer shells. The convergence of the solution for two-, three-, and five-layer plates has been analyzed. It has been found that modeling with volumetric elements results in larger deflections compared to modeling with shell elements, and reducing the mesh size significantly increases the calculation time. Recommendations are given on the choice of modeling method for obtaining reliable results.

Keywords: *multilayer glass, finite element method, CAE Fidesys, volume finite elements, plate finite elements, Mooney-Rivlin model, polyvinyl butyral (PVB), deflection, solution convergence.*