

ной. Движение происходит под действием переменного по времени перепада давления. Перемещение внутренней оболочки относительно внешней на торцах отсутствует. Механическая система считается термостабилизированной. Внешняя поверхность внешней оболочки является геометрически нерегулярной и имеет n ребер жесткости ступенчато изменяющейся высоты, которые будут описываться с помощью разности функций Хэвисайда. Ребра представляют собой внешние шпангоуты, высота j -го ребра равна h_{pj} . Будем считать ребра жесткости бесконечно тонкими. Геометрически нерегулярная оболочка на торцах имеет свободное опирание. Решается задача определения АЧХ внешней оболочки.

Математическая модель состоит из связанной системы уравнений динамики оболочек, уравнений динамики вязкой несжимаемой жидкости и соответствующих граничных условий. Задача решается комбинацией аналитических и численных методов: уравнения гидродинамики решаются аналитическими методами, а получившиеся в дальнейшем уравнения динамики упругих соосных оболочек – численными. Применяя описанный в [4] подход, получим систему линейных алгебраических уравнений, которая требует аналитического решения. Конечно, можно перейти к численному решению, но тогда, даже зная все параметры, невозможно определить АЧХ.

Процесс параллельных вычислений будем осуществлять в символьном виде с использованием Maple. Предварительные эксперименты показали, что значимая задержка по времени при вычислениях происходит из-за возникновения коэффициентов, описывающих геометрическую нерегулярность, и использования разности функций Хэвисайда. Данная проблема была реализована при дополнительном распараллеливании таких вычислений. Это позволило увеличить эффективность и скорость параллельных вычислений примерно на 20 % при увеличении числа ребер жесткости. Тестирование производили на одном и том же компьютере без учета времени загрузки программного обеспечения. Оценка для задачи гидроупругости для представленной задачи по закону Закона Густафсона – Барсиса составила 2,4. То есть при последовательной программе скорость выполнения была бы в 2,4 раза больше по времени. Формирование единого вычислительного комплекса в Maple в значительной степени дает более широкие возможности для дальнейшего применения модели в научных исследованиях. Предложенный метод для решения задачи гидроупругости с использованием параллельных вычислений, автоматизирующий его проблемно-ориентированный комплекс, может быть основой для других научных исследований в области гидроупругости.

Список литературы

- 1 **Кондратов, Д. В.** Математическое моделирование ламинарного движения жидкости в упругой цилиндрической трубе кольцевого профиля со свободным опиранием по торцам / Д. В. Кондратов, Ю. Н. Кондратова, Л. И. Могилевич // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2009. – Т. 1, № 1 (37). – С. 33–40.
- 2 **Вельмисов, П. А.** Математическое моделирование в задачах динамики виброударных и аэроупругих систем / П. А. Вельмисов, В. К. Манжосов. – Ульяновск : УлГТУ, 2014. – 204 с.
- 3 **Кондратов, Д. В.** Гидроупругость силового цилиндра с полым плунжером при свободном истечении жидкости / Д. В. Кондратов // Вестник Саратовского госагроуниверситета им. Н. И. Вавилова. – 2008. – № 1. – С. 38–43.
- 4 Параллельные вычисления в задачах гидроупругости соосных оболочек / О. В. Елистратова, Д. В. Кондратов, И. В. Плаксина, Ю. Н. Кондратова // Проблемы безопасности на транспорте : материалы XI Междунар. науч.-практ. конф. ; под общ. ред. Ю. И. Кулаженко. – Гомель : БелГУТ, 2021. – С. 129–130.
- 5 **Романский, С. О.** Высокопроизводительные вычисления : учеб. пособие / С. О. Романский. – Хабаровск : Изд-во ДВГУПС, 2019 – 104 с.

УДК 691.419:539.41

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫНУЖДЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ ПРИ ПЕРЕВОЗКЕ ПАКЕТА СЭНДВИЧ-ПАНЕЛЕЙ С УЧЕТОМ ИХ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО НАПРЯЖЕНИЯ

И. Е. КРАКОВА, О. И. ЦЫГАНОВ

Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

Трехслойные строительные панели, широко используемые в строительной отрасли, представляют собой конструкции, которые состоят из двух внешних слоев и внутреннего слоя, обеспечиваю-

щего их совместную работу. В большинстве таких конструкций внешние слои изготавливаются из прочных материалов, таких как сталь или алюминий, а внутренний слой – из менее прочного материала, такого как пенопласт, пенополистирол, пенополиуретан или минеральная вата. Такие панели чаще всего доставляются на строительные площадки автотранспортом. Целостность груза при транспортировке и безопасность перевозки зависят от правильного размещения и крепления груза в кузове транспортного средства. В Беларуси все перевозки и крепление грузов в кузове автотранспорта осуществляются в соответствии с Правилами крепления грузов на автомобильном транспорте. Однако стоит отметить. Это эти правила ориентированы на жесткие грузы, в то время как многие доставляемые материалы, включая строительные сэндвич-панели, обладают высокой деформативностью.

Пакеты из таких панелей имеют небольшую массу, но значительные габаритные размеры. Для снижения затрат на транспортировку часто их размещают в кузове автомобиля в два яруса. По этой причине центр тяжести груза оказывается высоко расположенным над полом автоплатформы, что приводит к значительным динамическим нагрузкам при переходных режимах движения. Учитывая, что сэндвич-панели вследствие малой жесткости среднего слоя обладают высокой деформативностью, возможно появление резонансов, связанных с совпадением частот колебаний автомобиля с собственными частотами колебаний груза. Всё это может стать причиной повреждения сэндвич-панелей в процессе транспортировки.

Целью данной работы стало нахождение параметров колебаний пакетов строительных сэндвич-панелей, уложенных друг на друга, при их транспортировке автотранспортным средством, с учетом их крепления.

В настоящее время существует множество исследований, посвященных трехслойным пластинам. В работах [1–3] исследовались вынужденные колебания тонких пластин под действием различных видов нагрузок (сосредоточенная, распределенная постоянная и распределенная изменяющаяся силы) с учетом различных граничных условий. Авторы исследования [1] определяли амплитуды динамических перемещений и изгибающих моментов. В работе [3] учитывались большие амплитуды колебаний и расчеты выполнялись для пластин, изготовленных из различных ортотропных материалов, с учетом геометрической нелинейности. В исследовании [4] рассмотрены вынужденные нелинейные колебания многослойных пластин по цилиндрической поверхности с учетом демпфирования и внутреннего трения. Получены уравнения амплитудно-частотных и амплитудно-фазочастотных характеристик, а также проанализировано влияние параметров жесткости, сдвига, демпфирования и нагружения на резонансные значения амплитуды и частоты. Авторы работы [5] представили математическую модель, описывающую вынужденные колебания пакета плоских тонких пластин с точечными упругими связями и выполнили расчет собственных частот и форм поперечных колебаний пакета пластин при различных граничных условиях закрепления краев пластины (шарнирное опирание, защемление, свободный край).

В случае колебаний трехслойных пластин наблюдается ситуация, когда срединная плоскость остается неподвижной, а облицовочные слои с близкорасположенными слоями заполнителя, имеющего малую жесткость, движутся, принимая волнообразную форму. В исследовании [6] для такого случая получены выражения частот собственных колебаний при шарнирном закреплении краев несущих слоев. Вынужденные колебания прямоугольных трехслойных пластин рассмотрены в работах [7, 8], где принималось во внимание нарушение связи между несущим слоем и заполнителем, а также учитывалась неоднородность последнего.

Однако большинство работ не учитывает возможность размещения в два яруса пакетов, сформированных из аналогичных по размерам и физико-механическим свойствам трехслойных панелей, которые могут колебаться относительно подвижной системы координат. Ранее нами были выполнены исследования [9] вынужденных колебаний пакета сэндвич-панелей, состоящего из различного числа панелей, без учета крепления пакета к автоплатформе. Получены частоты собственных колебаний, выполнен анализ влияния вертикальных колебаний автотранспортного средства на амплитуды колебаний различных точек верхнего облицовочного слоя.

Строительная трехслойная сэндвич-панель представляет собой конструкцию, состоящую из двух лицевых (несущих) слоев, между которыми расположен средний слой – сердечник. Между собой слои соединены клеевым слоем. Несущие слои выполнены из тонкого листа стали, обладающего высокой прочностью. В данном исследовании сердечник выполнен из минеральной ваты.

Для анализа влияния вертикальных колебаний транспортного средства на частоты вынужденных колебаний пакета сэндвич-панелей с учетом крепления последних к кузову транспортного средства и были разработаны модели пакетов. Каждый пакет состоит из семи панелей (размер одной панели 7200×1000×0,5 мм), размещенных друг над другом. Между панелями симметрично относительно центра панели располагаются пенопластовые прокладки (размер одной прокладки 400×1000×40 мм). Нижняя панель в пакете опирается на такие же подложки. Рассмотрен случай расположения одинаковых пакетов в два яруса. Крепление пакетов к кузову осуществлено при помощи двух крепежных ремней, обеспечивающих силу предварительного натяжения 2500 Н, составляющими с полом автоплатформы угол 66°. Ремни шириной 0,05 м, толщиной 2 мм выполнены из полипропилена, расположены симметрично относительно поперечной оси симметрии панели.

Построение конечно-элементной модели и все последующие расчеты выполнялись в среде многоцелевой программы проектирования и анализа ANSYS [10]. С целью учета гравитационной силы, сил натяжения ремней на первом этапе выполнен статический анализ для определения напряженно-деформированного состояния пакета сэндвич-панелей. Полученные значения напряжений использовались для исследования колебаний пакета. Для установления частот, при которых возможен резонанс, на втором этапе выполнены расчеты собственных колебаний пакета с учетом преднапряжения и определены формы этих колебаний. Получены несколько диапазонов близких значений собственных частот, которые соответствуют однотипным колебаниям отдельных панелей из пакета. На следующем этапе выполнены расчеты вынужденных колебаний в диапазоне частот возбуждения 0–50 Гц. Коэффициент демпфирования, который используется для построения матрицы демпфирования, принимался равным $\beta = 0,002$ с. Получены формы вынужденных колебаний и амплитудно-частотные характеристики для различных точек ряда точек верхней панели в пакете. Вид амплитудно-частотных характеристик для исследованных точек практически не отличается, а максимальные перемещения соответствуют частоте в 11 Гц. В работе [9] для пакета из девяти сэндвич-панелей без учета крепления его к кузову автотранспортного средства для аналогичных точек панели резонансные значения перемещений соответствовали частоте 13 Гц.

Расчеты показали, что даже при креплении пакетов сэндвич-панелей при помощи двух крепежных ремней амплитуды вынужденных колебаний в сравнении с вариантом без крепления меньше, но всё-таки значительны. Поскольку даже при движении автотранспортного средства по дорогам его кузов колеблется с частотой 5–7 Гц, а при экстренных ситуациях эти значения могут увеличиться, то для обеспечения безопасной перевозки сэндвич-панелей автотранспортными средствами при обеспечении целостности груза необходимо выполнять их достаточное крепление в кузове транспортного средства.

Список литературы

- 1 Rossi, R. E. Forced vibrations of rectangular plates subjected to harmonic loading distributed over a rectangular subdomain / R. E. Rossi, R. H. Gutiérrez, P. A. A Laura // *Ocean Engineering*. – 2001. – Vol. 28, is. 12. – P. 1575–1584.
- 2 Celep, Z. Forced Vibrations of an Elastic Rectangular Plate Supported by Unilateral Edge Lateral Springs / Z. Celep, Z. Özcan // *Arabian Journal for Science and Engineering*. – 2023. – № 48 (1). – DOI:10.1007/s13369-023-07939-x.
- 3 Dumir, P. C. Nonlinear forced vibration of orthotropic thin rectangular plates / P. C. Dumir, A. Bhaskar // *International Journal of Mechanical Sciences*, 1988. – Vol. 30, is. 5. – P. 371–380. ISSN 0020-7403.
- 4 Куликов, Г. М. Вынужденные нелинейные колебания многослойных пластин / Г. М. Куликов, Ю. В. Кулешов // *Вестник ТГТУ*. – 2002. – № 3. – С. 483–489.
- 5 Берикханова, Г. Е. Математическая модель колебаний пакета прямоугольных пластин с учетом точечных связей / Г. Е. Берикханова, Б. Т. Жумагулов, Б. Е. Кангужин // *Вестник Томского государственного университета. Математика и механика*. – 2010. – № 1. – С. 72–86.
- 6 Lopatin, A. V. Symmetrical facing wrinkling of composite sandwich panels / A. V. Lopatin, E. V. Morozov // *Journal of Sandwich Structures and Materials*. – 2008. – Vol. 10, is. 6. – P. 475–497.
- 7 Burlayenko, V. N. Nonlinear dynamic analysis of harmonically excited debonded sandwich plates using finite element modelling / V. N. Burlayenko, T. Sadowski // *Composite Structures*. – 2013. – Vol. 108. – P. 354–366.
- 8 Vranić, A. Analysis of Design Parameters Influences on Modal Behaviour of Sandwich Panels / A. Vranić, S. Ćirić Kostić // *IMK-14 – Research & Development in Heavy Machinery*. – 2015. – Vol. 21, is. 1. – P. 29–34.
- 9 Кракова, И. Е. Конечно-элементное моделирование вынужденных колебаний сэндвич-панели / И. Е. Кракова, О. И. Цыганок // *Механика. Исследования и инновации*. – Гомель, 2023. – Вып. 16. – С. 105–110.
- 10 Altabay, W. A. Using ANSYS for finite element analysis. Vol. II : Dynamic, probabilistic design and heat transfer analysis / W. A. Altabay, M. Noori, L. Wang. – New York, NY : Momentum Press, 2018. – 224 p.