

УДК 534.23

## ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМОВ ПРОНИКНОВЕНИЯ ЗВУКОВОГО УДАРА В ПОМЕЩЕНИЕ

© 2025 г. А. А. Валишина<sup>1,\*</sup>, В. В. Веденеев<sup>1,\*\*</sup>,  
Л. Р. Гареев<sup>1,\*\*\*</sup>, К. А. Жидяев<sup>1,\*\*\*\*</sup>

Представлено академиком РАН С.Л. Чернышевым 21.03.2025 г.

Поступило 22.04.2025 г.

После доработки 22.04.2025 г.

Принято к публикации 14.07.2025 г.

Представлены результаты численного моделирования проникновения звукового удара в помещение через окно здания. Результаты расчетов валидированы натурными измерениями звукового удара, вызванного пролетающим на крейсерской высоте сверхзвуковым самолетом. Получено, что основным механизмом передачи является смещение оконного блока в оконном проеме как целого, а не через возбуждение низшей собственной формы колебания окна. Проведено исследование влияния жесткости и демпфирования заделки оконного блока в оконном проеме на прохождение звукового удара. Установлено, что увеличение обоих этих параметров существенно снижает амплитуду звукового удара внутри помещения.

*Ключевые слова:* звуковой удар, акустика сооружений, упругость оконных креплений

**DOI:** 10.7868/S3034508125050082

При эксплуатации сверхзвуковой авиационной техники возникают ударные волны [1], которые оказывают воздействие на расположенные на земле конструкции (жилые здания, коммерческие сооружения, транспорт). Вибрации, вызванные ударными волнами высокой интенсивности, приводят к снижению усталостного ресурса конструкций, а также оказывают негативное влияние на комфорт и здоровье людей. В связи с этим высока актуальность разработки способов численного моделирования и анализа механизмов воздействия звукового удара на здания для оценки как прочности здания и окон, так и экранирования внутренних помещений от звукового удара.

В литературе описаны несколько исследований влияния звукового удара на здания, проведенных в натуральных условиях, – в них приводятся результаты полевых испытаний: измерение шума и вибраций, вызванных пролетом сверхзвукового самолета [2–5]. Эти работы дают

ценную информацию для валидации расчетных моделей.

Снижение уровня звукового удара на земле может достигаться разными способами. Основными являются оптимизация компоновки и внешней геометрии самолета на этапе проектирования [1, 6–8] и выбор режима полета и траектории самолета над поверхностью земли [9]. Ряд работ [10–12] посвящен расчетам распространения звукового удара в дальнем поле по результатам продувок или численного моделирования ближнего поля обтекания самолета. При этом на распространение ударной волны оказывают влияние атмосферные условия, такие как распределение атмосферных параметров по высоте и уровень атмосферной турбулентности [13, 14].

После достижения ударной волной поверхности земли, она взаимодействует со зданиями, которые частично экранируют ударную волну от находящихся внутри людей. Поскольку в Северной Америке жилые здания часто имеют каркасное строение с низкой жесткостью стен, то звуковой удар может передаваться в помещение через колебания стен и здания в целом. Этому вопросу посвящены работы [15–18], где численно и экспериментально анализируется отклик каркасной стены, здания и комплекса

<sup>1</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

\* E-mail: alya\_valishina@bk.ru

\*\* E-mail: vasily@vedeneev.ru

\*\*\* E-mail: gareev@imec.msu.ru

\*\*\*\* E-mail: kirill.a.zhidyayev@imec.msu.ru

зданий на звуковой удар. В Европе и России более распространены деревянные, кирпичные и бетонные здания с достаточно жесткими стенами. В таких зданиях основная передача звукового удара в помещение происходит через окна. Механике соединения оконной рамы с проемом, которая определяет механизм передачи удара внутрь помещений, посвящены работы [19, 20].

В настоящей работе на основе метода конечных элементов моделируется здание, находящееся в аэропорту Третьяково в г. Луховицы (рис. 1), на которое действует акустическая нагрузка, вызванная ударной волной от пролетающего сверхзвукового самолета. За экспериментальную основу в работе берутся данные из исследования [5].

## 1. ОПИСАНИЕ МЕТОДИКИ ПРОВЕДЕНИЯ РАСЧЕТОВ

### 1.1. Геометрия модели и физические свойства материалов

Моделируемое здание расположено на плоской поверхности земли, которая принимается абсолютно жесткой с моделируемыми размерами  $200 \times 200$  м (Д  $\times$  Ш), многократно превышающими размеры здания. Вокруг здания смоделирована акустическая среда размером  $55 \times 44.28 \times 22.88$  м (Д  $\times$  Ш  $\times$  В), значительно превышающая размеры рассматриваемой комнаты и внутреннего акустического пространства в ней (рис. 2а). Исследуемое здание трехэтажное и построено из кирпича (рис. 1). В расчете

моделировалась центральная секция здания, внешними архитектурными элементами пренебрегалось (рис. 2б). Все используемые материалы в модели считались изотропными с одинаковыми упругими свойствами и толщинами (табл. 1).

Модель комнаты, в которой проводились измерения, имеет размеры между срединными поверхностями стен  $5 \times 4.28 \times 3.15$  м (Д  $\times$  Ш  $\times$  В) — такая геометрия внутреннего акустического пространства соответствует натурной (рис. 2в). В одной из внешних стен тестовой комнаты расположены два створчатых стеклопакета размером  $1.45 \times 1.82$  м (Ш  $\times$  В). Стеклопакет представляют собой две деревянные рамы, расположенные на расстоянии 0.14 м друг от друга и содержащие по одинаковому набору стекол каждая (рис. 2г).

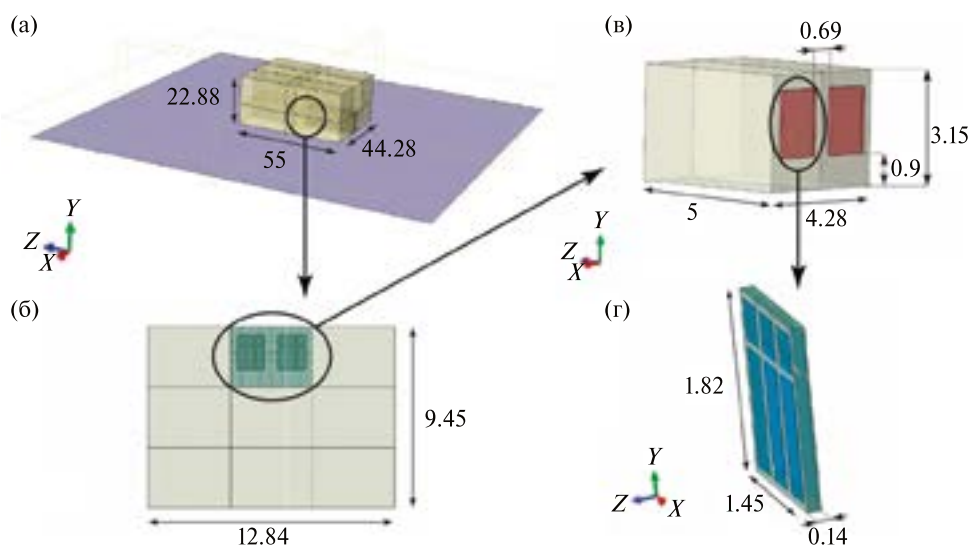
Внутри измерительной комнаты и между двумя рамами каждого окна смоделировано акустическое пространство. Свойства акустической среды соответствуют воздуху при нормальных условиях:  $\rho = 1.243$  кг/м<sup>3</sup>, объемный модуль  $k_f = 142\,000$  Н/м<sup>2</sup>, где  $k_f = \rho c^2$ , а  $c$  — скорость звука.

### 1.2. Конечно-элементная модель

Была разработана сеточная конечно-элементная модель здания. Она состоит из ~610 тыс. элементов, включающих плоские оболочечные четырехугольные элементы здания и земли и трехмерные гексаэдральные элементы акустического пространства. Для конечных элементов, моделирующих элементы здания, решались уравнения линейной теории оболочек Миндлина, которая учитывает поперечную сдвиговую



Рис. 1. Здание, в котором происходили экспериментальные измерения, описанные в работе [5]. Комната с датчиками виброускорения и микрофонами выделена красным прямоугольником.



**Рис. 2.** Модель внешнего акустического пространства и плоскости земли (а), значимая для расчетов часть здания внутри внешнего акустического пространства (б), моделируемое внутреннее акустическое пространство исследуемой комнаты и стеклопакетов (в) и геометрия стеклопакета (г) для проводимого конечно-элементного анализа. Все размеры указаны в метрах.

**Таблица 1.** Свойства материалов в модели

№	Материал	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$E$ , ГПа	$\nu$	Толщина, м
1	Кирпичная кладка	1646	3	0.25	0.5
2	Бетон	2400	20	0.17	0.2
3	Стекло	2500	50	0.25	0.004
4	Деревянная рама	500	12	0.1	0.05

жесткость. Для элементов, моделирующих акустическую среду, решалось волновое уравнение, свойства среды были приняты равными свойствам воздуха при нормальных условиях.

Соединения оконных рам со стенами здания моделировались при помощи упругой точечной связи (рис. 3) с шестью степенями свободы с заданной жесткостью по каждой степени свободы. Жесткость точечных связей определяет жесткость монтажа окна в оконном проеме. На горизонтальных ребрах рам задано по две точки крепления к зданию, на вертикальных – по три.

### 1.3. Приложенные нагрузки и граничные условия

Моделируется пролет самолета на высоте 11375 м при числе Маха  $M = 1.62$  (полет № 1 серии 2 в табл. 1 в [5]). На этой высоте скорость звука  $a = 299$  м/с, наклон слабой звуковой волны у поверхности земли (угол Маха) равен  $34^\circ$ . В системе координат модели вектор

направления движения волны давления имеет компоненты 0.18,  $-0.83$ , 0.53, скорость распространения волны соответствует скорости полета самолета  $v = M \times a$ .

Измеренное в эксперименте звуковое давление вне здания, вызванное звуковым ударом, было задано в расчетной модели в виде зависимости давления в движущейся волне от времени, при этом, поскольку измеренный сигнал учитывает как падающую, так и отраженную волну, для падающей волны учитывался коэффициент  $1/2$ .

Были заданы следующие граничные условия: на поверхности земли ставится условие нулевых перемещений, для сопряжения акустической среды с элементами конструкции здания (стены, перекрытия, рамы, стекла) ставятся кинематическое и динамическое условия – равенство перемещений и нормальных напряжений. На внешних поверхностях акустической среды задано давление, соответствующее приведенным

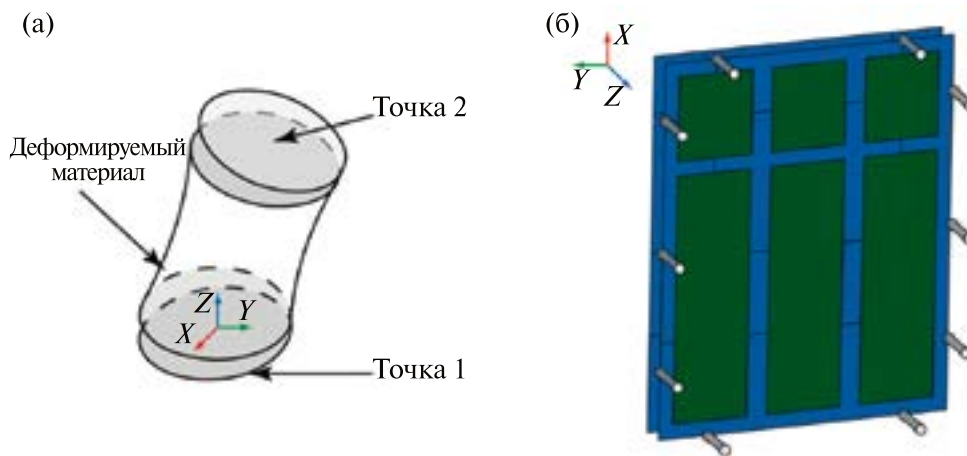


Рис. 3. Схема упругой точечной связи, соединяющей оконную раму и стены здания, в виде втулок (а) и их месторасположения на раме (б).

выше параметрам перед и за двигающейся ударной волной. Решаются совместные уравнения линейной динамики и акустики; в качестве начальных условий задано отсутствие возмущений, вызванных ударной волной.

Наружное звуковое давление в эксперименте измерялось на расстоянии 0.01 м перед стеной под окном (на 0.46 м ниже подоконника). Внутренний микрофон, данные которого использованы для валидации, расположен в центре комнаты на высоте 1.2 м. Расчетные значения параметров получены в тех же точках, что и в эксперименте.

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

### 2.1. Собственные формы и частоты

Для анализа основного источника акустического давления, создающего шум внутри рассматриваемой комнаты, сначала был проведен анализ собственных форм и частот здания целиком без учета акустической среды (рис. 4, табл. 2). Отдельно также были рассчитаны собственные формы и частоты рамы со стеклами, они совпали с полученными из общей модели здания.

В первой серии расчетов использовалась жесткая заделка окон со следующими коэффициентами жесткости (отдельно было проверено, что более высокие значения жесткостей не меняют результат расчета):

$$D_{11} = D_{22} = 10^9 \text{ Н/м}, D_{33} = 10^7 \text{ Н/м}, \\ D_{44} = D_{55} = D_{66} = 10^9 \text{ Н} \times \text{м}.$$

Можно видеть, что низшие собственные частоты соответствуют колебанию здания в целом: первая и вторая формы – сдвигу в двух плоскостях, третья – крутильная, четвертая – изгибная, пятая – соответствует колебанию верхнего перекрытия. Ряд частот, начиная с 65 Гц, соответствуют собственным частотам и формам колебаний окна.

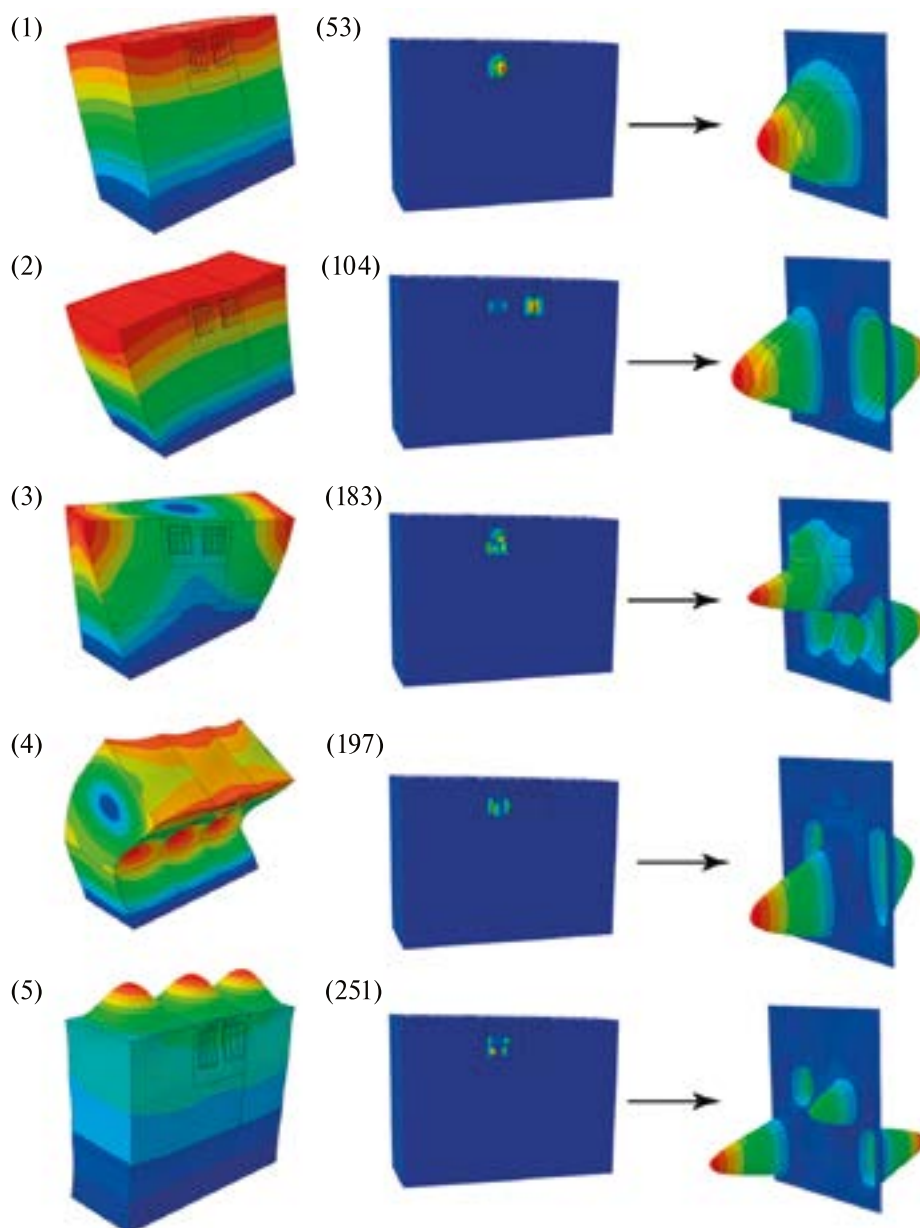
### 2.2. Расчет с жесткой заделкой оконных рам

Расчеты динамического отклика на звуковой удар проводились до времени 0.3 с, так как за этот промежуток отраженная от земли волна достигает границ внешней акустической среды. После этого в расчете появляется переотраженная волна и результаты теряют физический смысл.

На рис. 5а изображены рассчитанные значения в точке, соответствующей положению датчика во внешней акустической среде. Они качественно согласуются с экспериментальными значениями, имеющиеся отличия могут быть объяснены влиянием архитектурных особенностей здания (колонны, форма крыши), не учитываемых в модели, на отраженную волну.

Расчитанное давление в центре комнаты не согласуется с экспериментальным (рис. 5б). Из расчета видно, что характерная N-волна звукового удара фактически отсутствует, а основной вклад в давление в помещении вносит низшая собственная частота окна 65.5 Гц. При этом амплитуда давления в расчете на порядок меньше, чем в эксперименте.

Из этих результатов можно заключить, что окно, жестко закрепленное в проеме здания,



**Рис. 4.** Первые 5 собственных форм колебания здания (левый столбец). Собственные формы колебания здания, соответствующие собственным формам колебания оконных проемов (центральный и правый столбец соответственно). Цветом показано распределение относительных перемещений.

**Таблица 2.** Собственные частоты здания

№	Частота, Гц	№	Частота, Гц
колебания здания в целом		колебания рамы со стеклами	
1	9.5	53	65.5
2	12.7	104	92.8
3	14.8	183	129.2
4	28.1	197	133.3
5	29.2	251	151.4

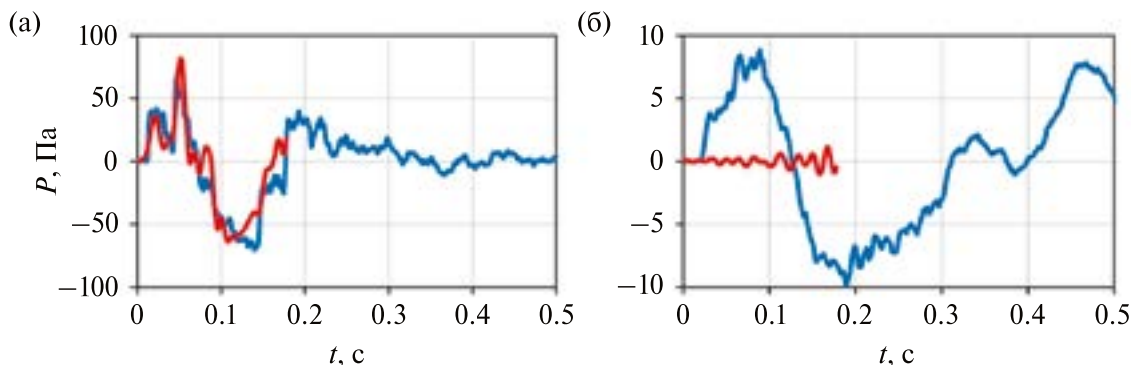


Рис. 5. Экспериментальная (синяя линия) и рассчитанная (красная линия) зависимости звукового давления от времени снаружи здания (а) и в центре комнаты внутри здания (б).

не передает внутрь помещения форму волны звукового удара. Вместо этого падающая на окно волна возбуждает собственные колебания окна, которые далее передаются в помещение. Такая модель не соответствует эксперименту и не отражает основных свойств механизма проникновения волны давления в помещение. Можно предположить, что принципиально важной является упругость заделки окна в оконном проеме. В этом случае окно способно смещаться внутрь и наружу в оконном проеме и передавать внешнее давление в помещение за счет своего смещения как целого аналогично поршню. Для подтверждения этой гипотезы далее рассматривается упругое закрепление окна в проеме.

### 2.3. Расчет с выбранной жесткостью упругой заделки окна

Жесткость закрепления окна в оконном проеме здания может быть существенно разной в зданиях аналогичной конструкции и должна быть измерена непосредственно на исследуемом окне. Поскольку данная возможность отсутствовала, жесткость подбиралась расчетно. В результате серии расчетов были выбраны жесткости, при которых давление внутри комнаты соответствует давлению из эксперимента:

$$\begin{aligned} D_{11} = D_{22} = 10^6 \frac{\text{Н}}{\text{м}}, \quad D_{33} = 10^4 \frac{\text{Н}}{\text{м}}, \\ D_{44} = D_{55} = D_{66} = 10^6 \text{ Н} \times \text{м}. \end{aligned} \quad (1)$$

График внутреннего давления в пределах первого максимума давления в этом случае качественно совпадает с экспериментальным (рис. 6).

Однако следующий минимум давления по амплитуде в 2–2.5 раза больше, чем в эксперименте.

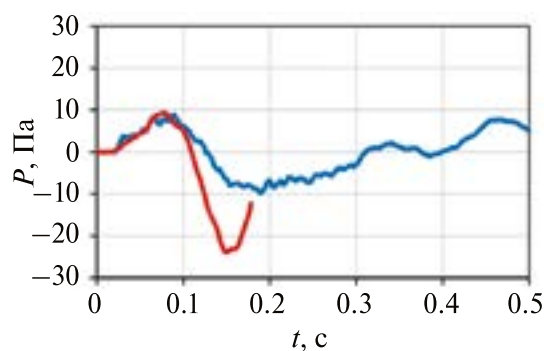


Рис. 6. Экспериментальная (синяя линия) и рассчитанная (красная линия) зависимости звукового давления от времени внутри здания с жесткостью заделки окна (1).

Данное различие можно объяснить двумя возможными факторами.

1. В расчете моделировалось замкнутое помещение, в то время как в эксперименте присутствует сообщение с другими помещениями (двери, вентиляционные короба и т.п.). После первого максимума давления воздух может частично перетекать из комнаты в соседние помещения с высоким сопротивлением, но затекать обратно с более низким сопротивлением.

2. Движение окна в проеме также может происходить несимметрично: меньшая жесткость (большее перемещение) при повышении наружного давления, когда окно смещается внутрь комнаты, и большая жесткость (меньшее перемещение) при обратном движении. Это также приведет к ослаблению минимального пика давления по сравнению с полученным в расчете.

Выяснить, какой из этих двух механизмов ответственен за более слабый пик минимума

давления в эксперименте, можно лишь при дополнительных исследованиях жесткости посадки окна в проеме в конкретном исследуемом здании.

#### 2.4. Валидация разработанной модели

Разработанная модель прохождения звукового удара с подобранными значениями жесткости соединения рамы с оконным проемом (1) была валидирована на двух дополнительных экспериментальных наборах данных для пролетов № 6 и № 8 из серии 2 того же самолета над зданием, приведенных в табл. 1 в [5]. Получен результат, аналогичный моделированию первого рассматриваемого пролета: график акустического давления снаружи хорошо совпадает с экспериментом, внутри комнаты — находится в пределах первого максимума давления. Как и в первом расчете, следующий минимум давления внутри комнаты по амплитуде в 2–2.5 раза больше, чем в эксперименте, по причинам, указанным выше.

Также был проведен анализ сеточной сходимости (уменьшение размеров элементов и шага по времени в 2 раза), подтвердивший отсутствие значимых различий в результатах.

### 3. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КОЭФФИЦИЕНТОВ ДЕМПФИРОВАНИЯ И ЖЕСТКОСТИ В ОКОННЫХ ЗАКРЕПЛЕНИЯХ НА ПРОХОЖДЕНИЕ ЗВУКОВОГО УДАРА

Показано, что увеличение жесткости заделки окон приводит к уменьшению давления прошедшей внутрь здания волны. Для того чтобы определить вид зависимости давления ударной волны, прошедшей внутрь комнаты от коэффициента

жесткости в окнах, было проделано несколько расчетов в той же модели с различными коэффициентами жесткости. Подобранный ранее коэффициент жесткости в креплениях рамы  $D_{33} = 10^4$  Н/м изменялся от  $0.1 \times D_{33}$  до  $15 \times D_{33}$ , соответственно, изменялась и первая собственная частота окна.

На рис. 7а приводится зависимость давления прошедшей внутрь комнаты волны от жесткости упругих связей, на которых крепятся окна. С уменьшением жесткости наблюдается возрастание давления, в то время как увеличение жесткости приводит к монотонному уменьшению амплитуды N-волны и доминированию собственных частот окна.

На рис. 7б показано сравнение графиков давлений внутри комнаты для различных коэффициентов демпфирования связей, моделирующих заделку окна в проеме. Коэффициент демпфирования увеличивался вплоть до критического  $K_{33}^{kp} = 2\sqrt{D_{33} m/n} = 560$  Н × с/м, где  $m = 78.3$  — масса окна,  $n = 10$  — количество связей. Видно, что амплитуда и в положительном, и в отрицательном пиках уменьшается с увеличением демпфирования. Тем не менее асимметрия между двумя пиками сохраняется, поэтому вариация только демпфирования не приводит к большему соответствию эксперименту, в котором N-волна имеет симметричную форму.

Таким образом, увеличивая жесткость или демпфирование в оконной заделке, можно значительно понизить амплитуду звукового удара, проходящего внутрь помещения.

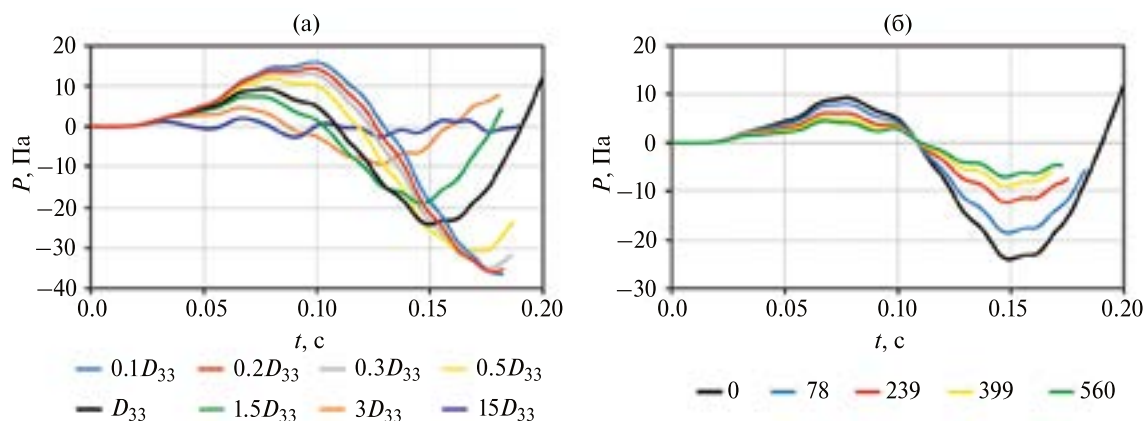


Рис. 7. Зависимость акустического давления внутри комнаты от времени при различных коэффициентах жесткости пружин (а) и при различных коэффициентах демпфирования  $K_{33}$  (Н × с/м) (б).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана конечно-элементная модель падения ударной волны, соответствующей профилю звукового удара, на здание. Результаты расчета удовлетворительно согласуются с экспериментом [5]. Установлено, что основным механизмом передачи звукового удара внутрь помещения является не упругость стекол или рам, а упругое закрепление окна в целом в оконном проеме. В результате основной эффект заключается в движении оконного блока в проеме как целого, в то время как упругая деформация рамы и стекло вносят на порядок меньший вклад в уровень звукового давления внутри помещения.

Показано, что повышение жесткости или демпфирования закрепления оконного блока в оконном проеме приводит к эффективному уменьшению уровня звукового давления внутри здания.

Обнаруженный в данной работе механизм передачи звука в помещения раньше не рассматривался в литературе. Во всех известных авторам работах считалось, что за передачу ответственны стены и здания в целом, что характерно для каркасных строений [15–18]. В работах, где рассматривалась передача звукового удара через окно, принималось его жесткое закрепление с оконным проемом по поступательным степеням свободы [19, 20]. В перечисленных работах передача звукового сигнала происходит через низшую собственную форму колебания здания, стены или окна. В то же время измерения [5] не подтверждают такой механизм передачи, что обуславливает важность исследованного в настоящей работе механизма передачи звукового удара в помещение.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность В. Ф. Копьеву и И. В. Беляеву за предоставление экспериментальных данных, полезные комментарии и обсуждения.

## ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследование выполнено в рамках государственного задания МГУ имени М.В. Ломоносова.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чернышев С.Л. Звуковой удар. М.: Наука, 2011. 351 с.
2. Newberry C.W. The response of buildings to sonic boom // J. Sound Vib. 1967. V. 6 (3). P. 406–418.
3. Klos J., Buehrle R.D. Vibro-acoustic response of buildings due to sonic boom exposure: june 2006 field test. NASA report TM-2007–214900. 2007.
4. Klos J. Vibro-acoustic response of buildings due to sonic boom exposure: july 2007 field test. NASA report TM-2008–215349. 2008.
5. Norén-Cosgriff K., Belyaev I., Løvholt F. Building vibration induced by sonic boom – field test in Russia // Appl. Acoustics. 2022. V. 185. 108422.
6. Rallabhandi S.K., Mavris D.N. Aircraft Geometry Design and Optimization for Sonic Boom Reduction // J. Aircraft. 2007. V. 44 (1). P. 35–47.
7. Farhat C., Maute K., Argrow B., Nikbay M. Shape Optimization Methodology for Reducing the Sonic Boom Initial Pressure Rise // AIAA Journal. 2007. V. 45 (5). P. 1007–1018.
8. Han Z., Qia J., Zhang L., Chen Q., Yang H., Ding Y., Zhang K., Song W., Son B. Recent progress of efficient low-boom design and optimization methods // Prog. Aerospace Sci. 2024. V. 146. 101007.
9. Ishikawa H., Makino Y., Ueno A., Kanamori M. Sonic Boom Assessment in Primary Boom Carpet of Low-Boom Supersonic Airplane (NASA C25D) // AIAA Scitech 2019 Forum. 2019. AIAA 2019–0298.
10. Киселев А.Ф., Коваленко В.В., Притуло Т.М. Исследование звукового удара: расчет и эксперимент // Инженерный журнал: наука и инновации. 2017. № 8 (68).
11. Руденко О.В., Маков Ю.Н. Звуковой удар: от физики нелинейных волн до акустической экологии (обзор) // Акуст. журн. 2021. Т. 67. № 1. С. 3–30.
12. Валиев Х.Ф., Крайко А.Н., Тилляева Н.И. Об упрощении численных и аналитических “инструментов” описания “звукового удара” // ЖВМиМФ. 2022. Т. 62. № 4. С. 642–658.
13. Чернышев С.Л. О распространении волны звукового удара в турбулентной среде // Уч. зап. ЦАГИ. 2018. Т. XXXVII. № 3. С. 52–61.
14. Юлдашев П.В., Карзова М.М., Хохлова В.А., Блан-Бенон Ф. Численное моделирование нелинейного параболического уравнения для анализа статистики воспринимаемого уровня шума волны звукового удара после прохождения турбулентного слоя атмосферы // Акуст. журн. 2021. Т. 67. № 1. С. 31–44.
15. Remillieux M.C., Burdisso R.A., Reichard G. Transmission of sonic booms into a rectangular room with a plaster–wood wall using a modal–interaction model // J. Sound Vib. 2009. V. 327. P. 529–556.

16. *Sizov N.V., Plotkin K.J., Hobbs C.M.* Predicting transmission of shaped sonic booms into a residential house structure // *J. Acoust. Soc. Am.* 2010. V. 127 (6). P. 3347–3355.
17. *Remillieux M.C., Corcoran J.M., Haac T.R., Burdisso R.A., Svensson U.P.* Experimental and numerical study on the propagation of impulsive sound around buildings // *Appl. Acoust.* 2012. V. 73. P. 1029–1044.
18. *Remillieux M.C.* External pressure loading, vibration, and acoustic responses at low frequencies of building components exposed to impulsive sound // *Appl. Acoust.* 2012. V. 73. P. 1059–1075.
19. *Ou D., Ming Mak C.* The effects of elastic supports on the transient vibroacoustic response of a window caused by sonic booms // *J. Acoust. Soc. Am.* 2011. V. 130 (2). P. 783–790.
20. *Ou D., Ming Mak C.* Minimizing the transient vibroacoustic response of a window to sonic booms by using stiffeners // *J. Acoust. Soc. Am.* 2014. V. 135 (4). P. 1672–1675.

## STUDY OF THE MECHANISMS OF PENETRATION OF SOUND SHOCK INTO A ROOM

**A. A. Valishina<sup>a</sup>, V. V. Vedeneev<sup>a</sup>, L. R. Gareev<sup>a</sup>, K. A. Zhidyaev<sup>a</sup>**

<sup>a</sup>*Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia*

Presented by Academician of the RAS S.L. Chernyshev

This paper presents the results of numerical modeling of the penetration of a sonic boom into a room through a building window. The calculation results are validated by field measurements of a sonic boom caused by a supersonic aircraft flying at cruising altitude. It is found that the main transmission mechanism is the displacement of the window frame in the window opening as a whole, and not the excitation of the first natural mode of the window. The influence of the stiffness and damping of the sealing of the window unit in the window opening on the passage of a sonic boom is studied. It is found that an increase in both of these parameters significantly reduces the amplitude of the sonic boom inside the room.

*Keywords:* sonic boom, acoustics of buildings, elasticity of window fastenings