

УДК 620.17:629.05:629.7

НАГРУЗКИ, ДЕЙСТВУЮЩИЕ НА ЖЕСТКУЮ СТЕНКУ, ПРИ УДАРЕ ВЫСОКОПОРИСТОГО ЦИЛИНДРА

Ю. В. Попов, Г. В. Белов, В. А. Марков, В. И. Пусев,
В. В. Селиванов, В. В. Фролов

Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана
(национальный исследовательский университет), 105005 Москва, Россия
E-mails: popovuv@bmstu.ru, belov-gora-2012@mail.ru, markovva@bmstu.ru,
pusevvi@bmstu.ru, selivanovvv@bmstu.ru, v-frolov93@mail.ru

Исследуется нагрузка на сооружение со стороны бортовой аппаратуры в момент удара по нему самолета. Выполнена оценка корректности и применимости модели самолета, представленного в виде жесткопластического стержня (подход Риеры), при изучении воздействия бортовой аппаратуры. Для моделирования этого воздействия использовались объемно перфорированные образцы из алюминиевого сплава. Проведены расчеты с использованием предложенной модели в одномерном приближении, а также прямое трехмерное моделирование удара методом конечных элементов с использованием пакета LS-DYNA. Оба указанных подхода позволяют исследовать процесс нагружения жесткой стенки. Показаны количественные и качественные различия этих подходов и подхода Риеры.

Ключевые слова: подход Риеры, бортовая аппаратура, механический эквивалент, объемно перфорированные образцы, высокоскоростное деформирование, удар, нагрузка.

DOI: 10.15372/PMTF20210120

Введение. В соответствии с российскими нормами строительного проектирования атомных электростанций (АЭС) [1] и международными правилами, отраженными в руководящих принципах Международного агентства по атомной энергии [2, 3], расчет прочности таких сооружений проводится для нагрузок, возникающих при ударе падающего самолета массой 20 т со скоростью 200 м/с. Такие нагрузки характерны при падении самолета военного назначения типа истребителя F-4 Phantom II [4].

В современной проектной практике принято проводить декомпозицию задачи об ударе самолета. При таком экстремальном воздействии сначала определяется внешняя ударная нагрузка, затем исследуется динамический отклик конструкции под действием заданной нагрузки. Таким образом, внешняя нагрузка при ударе самолета рассматривается изолированно от реальных преград и обычно определяется с использованием подхода Риеры [5, 6], в котором рассматривается взаимодействие с жесткой стенкой жесткопластического стержня, моделирующего самолет.

Подход Риеры, основанный на законе сохранения импульса, позволяет проводить расчет нагрузки на жесткую стенку $F_x(t)$ при ударе стержня с распределенной по длине

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 19-08-00701-а).

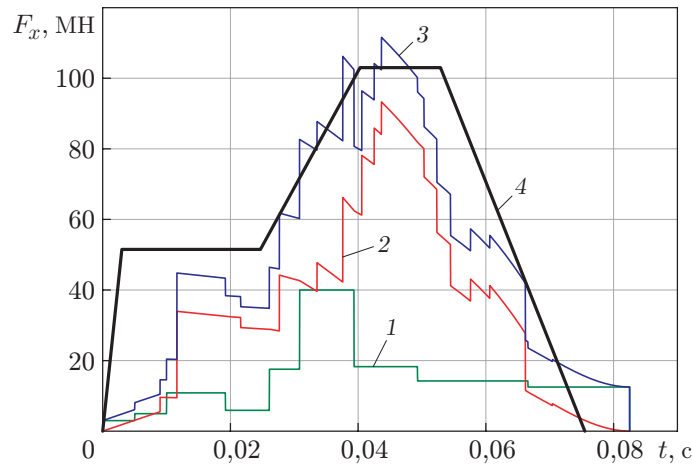


Рис. 1. Нагрузка на жесткую стенку [7]:

1 — прочностная составляющая нагрузки, 2 — инерционная составляющая нагрузки, 3 — полная нагрузка на жесткую стенку, 4 — полная нагрузка, рассчитанная в соответствии с российскими нормами

погонной массой $\mu(x)$ и предельной нагрузкой разрушения $P_c(x)$ в виде [5, 6]

$$F_x(t) = P_c[x_c(t)] + \mu[x_c(t)]V^2(t),$$

где $x_c(t) = \int_0^t V(\xi) d\xi$.

В работе [6] отмечено, что различие результатов разных исследований обусловлено использованием разных зависимостей $P_c(x)$.

В [7, 8] показано, что в соответствии с российскими нормами [1] нагрузка, как правило, является огибающей нагрузки, рассчитанной с использованием подхода Риеры (рис. 1 [7]). Прочностная составляющая нагрузки при ударе самолета военного назначения имеет тот же порядок, что и инерционная составляющая (см. рис. 1). Таким образом, обе составляющие необходимо учитывать. В работах [4, 6, 9, 10] при определении погонной массы и предельной нагрузки разрушения не учитываются механические свойства бортовой аппаратуры (БА). При этом как масса БА, так и доля ее в массе самолетов военного назначения постоянно увеличивается [11].

В [12] показано, что масса блоков БА составляет 70–75 % массы внутреннего оборудования носовых отсеков летательных аппаратов, а занимаемая ими площадь — 90–95 % площади поперечного сечения отсека. Механические свойства БА носовых отсеков самолетов определяются в основном механическими свойствами блоков БА [12].

Результаты численных расчетов. Блоки БА являются композиционной высокопористой средой, которая по своим механическим свойствам и составу материалов близка к высокопористым алюминиевым сплавам и сотовым конструкциям из алюминиевых сплавов [12].

В данной работе проведено исследование процесса нагружения жесткой стенки при высокоскоростном ударе стержней из высокопористого алюминиевого сплава, моделирующих БА [13].

Образцы (ударники), представлявшие собой объемно перфорированные стержни из алюминиевого сплава Д16Т, имели следующие размеры (рис. 2 [13]): $D = 24$ мм, $H_0 = 60$ мм, $d = 2,0$ мм, $z = 5,2; 4,8; 4,3; 4,1$ мм, $\alpha_0 = 2,16; 2,59; 3,77; 4,83$, $\rho_0 = 1287, 1073$,

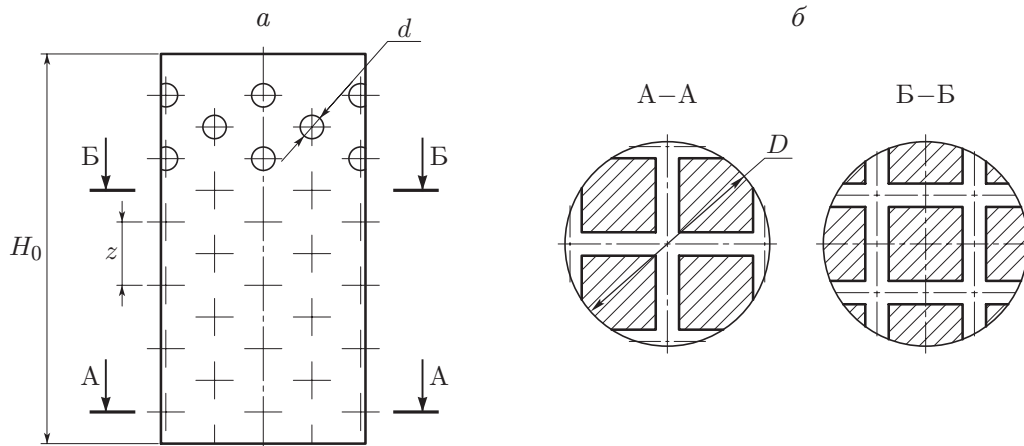


Рис. 2. Схема (а) и поперечные сечения (б) объемно перфорированного образца, испытываемого в эксперименте Тейлора [13]

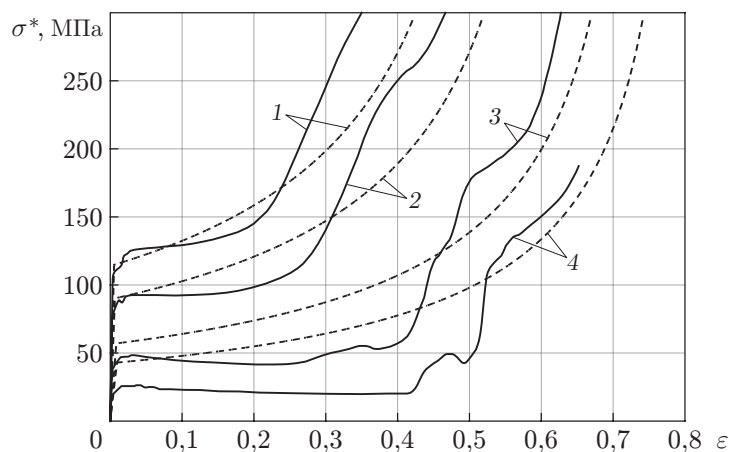


Рис. 3. Зависимости прочности объемно перфорированных образцов от деформации при различных начальных значениях пористости, полученные в результате прямого трехмерного моделирования с использованием пакета LS-DYNA (сплошные линии) и модели Кэрролла — Холта (штриховые линии):

1 — $\alpha_0 = 2,16$, 2 — $\alpha_0 = 2,59$, 3 — $\alpha_0 = 3,77$, 4 — $\alpha_0 = 4,83$

737, 576 кг/м³ соответственно (α_0 — начальная пористость образцов, равная отношению плотности материала матрицы к средней плотности образца ρ_0). Полученные при моделировании результаты сравнивались с экспериментальными данными (по остаточной длине ударника [13]).

Для определения предельной нагрузки разрушения с помощью подхода Риеры использовались эффективные пределы текучести, полученные в результате численного моделирования процесса сжатия образцов в трехмерной постановке с заданной пористостью (рис. 3 [13]).

В данной работе в одномерной постановке численно решались конечно-разностные уравнения механики сплошных сред. Для описания поведения высокопористой среды использовалась модель “полых сфер” Кэрролла — Холта [14]. Эта модель является одной из наиболее простых моделей, но достаточно точно описывает поведение высокопористой

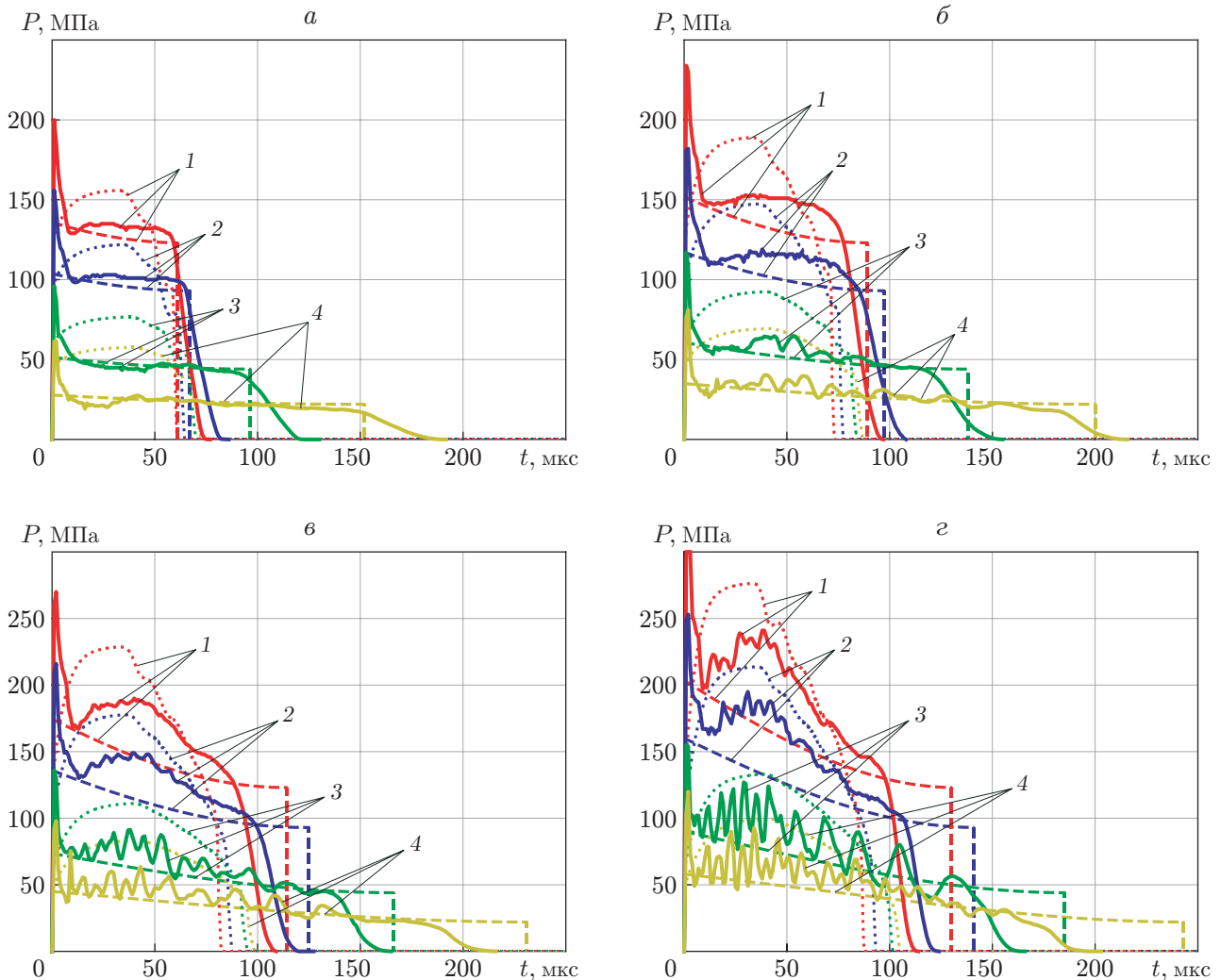


Рис. 4. Зависимости нагрузки, действующей на жесткую стенку, от времени при различных значениях скорости удара и пористости:

a — $V = 100$ м/с, $б$ — $V = 150$ м/с, $в$ — $V = 200$ м/с, $з$ — $V = 250$ м/с; сплошные линии — нагрузка, рассчитанная с использованием пакета LS-DYNA, штриховые — нагрузка, рассчитанная с использованием подхода Риеры [2], пунктирные — нагрузка, рассчитанная с использованием одномерной модели, предложенной в данной работе; 1 — $\alpha_0 = 2,16$, 2 — $\alpha_0 = 2,59$, 3 — $\alpha_0 = 3,77$, 4 — $\alpha_0 = 4,83$

среды с учетом свойств материала матрицы и начальной пористости. В работе [14] исследовалось схлопывание изолированной сферической поры в одномерном приближении. Процесс деформирования высокопористой среды включает упругую, упругопластическую и пластическую стадии. Данная модель позволяет априорно (без экспериментов и прямого конечноэлементного моделирования) получить диаграммы деформирования в первом приближении.

На рис. 4 приведены зависимости нагрузки, действующей на жесткую стенку, от времени. Эти зависимости получены в результате численного моделирования с использованием пакета LS-DYNA, подхода Риеры [2] и одномерной модели, предложенной авторами данной работы.

Заключение. Давление, полученное с использованием модели “полых сфер”, является верхней оценкой давления, возникающего в высокопористой среде. При этом кривые полученных зависимостей являются огибающими кривых зависимостей, полученных при моделировании среды с заданной пористостью.

При скорости удара $V = 100$ м/с результаты расчетов по модели Риеры достаточно близки к результатам численного моделирования с заданной пористостью, особенно для образцов с небольшой плотностью. Следует отметить, что для оценки прочностной составляющей нагрузки использовались значения предела текучести, полученные в результате прямого моделирования.

При увеличении скорости удара до значения $V = 150$ м/с для образцов с большой плотностью следует учитывать упрочнение (в модели Риеры оно не учитывается). При скорости $V = 200$ м/с вследствие схлопывания пор для образцов с небольшой плотностью появляются колебания нагрузки. При увеличении скорости до значения $V = 250$ м/с указанные эффекты усиливаются, в результате чего нагрузки становятся больше нагрузок, рассчитанных с использованием подхода Риеры.

Исследование высокоскоростного деформирования механических эквивалентов БА показало, что на начальной стадии нагружения наблюдается пик нагрузки, обусловленный ее ударным характером. Время существования пика соответствует времени, за которое волны разгрузки совершают несколько пробогов от ближайших отверстий в поперечном сечении к торцу и обратно. Уменьшение нагрузки на жесткую стенку происходит достаточно плавно.

Решение задачи в одномерном приближении с использованием для описания поведения материала модели “полых сфер” Кэрролла — Холта [14] позволяет получить кривую, которая является огибающей кривой, соответствующей нагрузке, полученной при трехмерном моделировании пористой среды, но не позволяет моделировать пик нагрузки, возникающий в момент удара, так как в расчетах используются осредненные характеристики среды.

В работе показано, что нагрузка на жесткую стенку может значительно отличаться от нагрузки, рассчитанной с использованием подхода Риеры, вследствие влияния упрочнения и ударного характера нагрузки. Предложены подходы, позволяющие учитывать нагрузку со стороны БА, что особенно важно на начальной стадии воздействия летательного аппарата на сооружения АЭС.

ЛИТЕРАТУРА

1. **ПиН АЭ-5.6.** Нормы строительного проектирования АС с реакторами различного типа. Правила и нормы в атомной энергетике: Утв. Мин-вом атом. энергетике СССР 29.12.1986. М.: Б. и., 1986.
2. **External events excluding earthquakes in the design of nuclear power plant: safety guide / IAEA safety standards. Ser. NS-G-1.5.** Vienna: IAEA, 2003. [Электрон. ресурс]. Режим доступа: http://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1159_web.pdf.
3. **External human-induced events in site evaluation for nuclear power plants: safety guide / IAEA safety standards. Ser. NS-G-3.1.** Vienna: IAEA, 2002. [Электрон. ресурс]. Режим доступа: http://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1126_scr.pdf.
4. **Бирбраер А. Н.** Экстремальные воздействия на сооружения / А. Н. Бирбраер, А. Ю. Роледер. СПб.: С.-Петербург. политехн. ун-т, 2009.
5. **Riera J. D.** On the stress analysis of structures subjected to aircraft impact forces // Nuclear Engng Design. 1968. V. 8, N 4. P. 415–426.

6. **Riera J. D.** A critical reappraisal of nuclear power plant safety against accidental aircraft impact // Nuclear Engng Design. 1980. V. 57, N 1. P. 193–206.
7. **Markov V. A., Popov Y. V., Pusev V. I., Selivanov V. V.** Computing the loads affecting a structure subjected to a high-velocity projectile impact using the Riera approach // AIP Conf. Proc. 2019. V. 2103. 020010. [Электрон. ресурс]. Режим доступа: <https://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.5099874>.
8. **Selivanov V. V., Markov V. A., Popov Yu. V., Pusev V. I.** About the calculation of the load on the building at high-speed aircraft impact based on the Riera's approach // AIP Conf. Proc. 2019. V. 2171. 130007. [Электрон. ресурс]. Режим доступа: <https://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.5133274>.
9. **Sugano T., Tsubota H., Kasai Y., et al.** Full-scale aircraft impact test for evaluation of impact force // Nuclear Engng Design. 1993. V. 140, N 3. P. 373–385.
10. **Duan Z.-P., Zhang L.-S., Wen L.-J., et al.** Experimental research on impact loading characteristics by full-scale airplane impacting on concrete target // Nuclear Engng Design. 2018. V. 328. P. 292–300.
11. **Пусев В. И., Белов Г. В., Марков В. А. и др.** Исследование конструкций и характеристик внутреннего оборудования носовых отсеков летательных аппаратов // Сб. тр. 12-го Всерос. съезда по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики, Уфа, 19–24 авг. 2019 г. Уфа: Ред.-издат. центр Башкир. гос. ун-та, 2019. Т. 3. С. 521–523.
12. **Марков В. А., Овчинников А. Ф., Пусев В. И.** Модельная среда для внутреннего оборудования носовых отсеков летательных аппаратов // Вестн. Моск. гос. техн. ун-та им. Н. Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2010. Спецвыпуск. С. 196–206. [Электрон. ресурс]. Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/modelnaya-sreda-dlya-vnutrennego-oborudovaniya-nosovyh-otsekov-letatelnyh-apparatov.pdf>.
13. **Белов Г. В., Гусаров А. П., Марков В. А. и др.** Применение теста Тейлора для исследования динамических механических свойств высокопористого алюминиевого сплава // Наука и образование. 2012. № 9. [Электрон. ресурс]. Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/15395303>.
14. **Carroll M. M., Holt A. C.** Static and dynamic pore-collapse relations for ductile porous materials // J. Appl. Phys. 1972. V. 43, N 4. P. 1626–1636.

*Поступила в редакцию 28/IX 2020 г.,
после доработки — 28/IX 2020 г.
Принята к публикации 26/X 2020 г.*
