

# ТРАНСПОРТНАЯ АВАРИЯ САМОЛЁТА ИЛ-76ТД. ВЛИЯНИЕ НА НАГРУЖЕННОСТЬ ПЕРЕВОЗИМЫХ УПАКОВОК МАТЕ- РИАЛА ПРЕГРАД

*О. Ю. Жабунина*, кандидат технич. наук, *Н. М. Натыньчик*,  
*М. В. Никульшин*, кандидат технич. наук, *О. С. Путилин*, канд. техн. наук

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академ. Е.И. Забабахина»

При перевозке упаковок с грузами к месту назначения может использоваться самолет Ил-76ТД. При этом не исключено возникновение аварийной ситуации, следствием которой является столкновение самолёта с преградой. Если транспортируемый груз является опасным, то есть содержит токсичные, взрывчатые или радиоактивные вещества, то вопрос о его состоянии в условиях интенсивных ударных воздействий важен с точки зрения безопасности окружающей среды.

Характерной особенностью авиационных аварий является высокая скорость подлёта к преграде. Так, в случае падения с крейсерского полёта она может достигать 900 км/ч (240 м/с). При этом материал поверхностей (преград), с которыми сталкивается самолёт, может быть различным: глина, бетон, гранит, гравий и др.

Ранее проведённые исследования, результаты которых были изложены в докладе [1], позволили сделать следующие выводы:

1) разработанная конечно-элементная модель (КЭМ) самолёта Ил-76ТД, см. рис. 1, отражает его габаритно-массовые параметры и нагружение преграды, соответствующее аналитической оценке (упаковки с грузами были представлены в виде трёх габаритно-массовых макетов – упругих твёрдотельных элементов в виде кубов со стороной 1,5 м, массой 2 т, в носовой части грузового отсека установлена коробка с документацией и запасными частями). На основе разработанной модели рассмотрены задачи столкновения самолета с абсолютно жёсткой преградой на скорости от 90 до 240 м/с с углами подлета к преграде – от 0 до 90°;

2) наиболее интенсивное воздействие на упаковки реализуется при фронтальном ударе самолета об абсолютно жёсткую преграду со скоростью  $v = 240$  м/с, максимальная перегрузка на упаковках достигает  $3,0 \cdot 10^4$  ед.

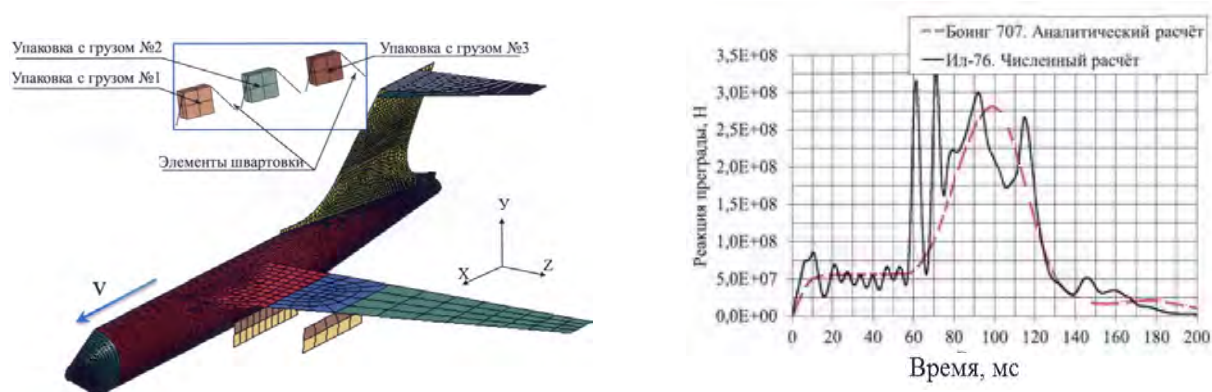


Рис. 1. Конечно-элементная модель самолёта Ил-76ТД с упаковками и её верификация на основе аналитических расчётов аналогичного самолёта – Боинга 707

Темой доклада является оценка влияния на нагруженность транспортируемых самолётом Ил-76ТД упаковок с грузами (далее упаковок) материала преград в случае наиболее тяжёлой аварии - при фронтальном ударе самолета о преграду со скоростью  $v=240$  м/с.

### Расчётная модель самолёта Ил-76ТД с упаковками и преграды

Для решения поставленной задачи к КЭМ самолёта была добавлена модель преграды в виде твердотельного блока с соответствующими свойствами материала, см. рисунок 2. Масса блока – не менее 45 тыс. тонн, что превышает массу самолёта с упаковками на борту более чем в 200 раз.

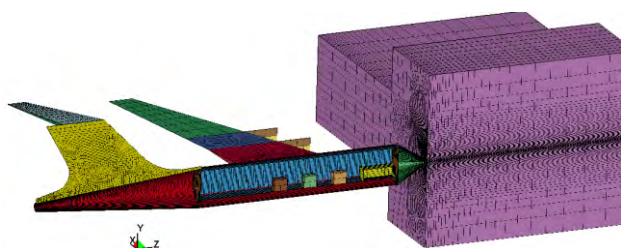


Рис. 2. Расчётная КЭМ самолёта Ил-76ТД с упаковками и преграды

Характеристики материалов преграды (средние значения из [2-4]) приведены в табл. 1.

### Предварительные оценки

Для оценки правильности результатов численных расчётов предварительно были выполнены аналитические расчёты глубин проникания самолёта в преграды ( $\Delta$ ). Отметим, что этот параметр, наряду с деформированием самолёта, может существенным образом влиять на длительность ударного импульса, действующего на упаковки, расположенные в самолёте. Также рассмотрены результаты имеющихся ударных испытаний самолёта и реальных аварийных ситуаций.

1. Глубину проникания упругого стального ударника с конической формой наконечника в немерзлый грунт (суглинок) и мёрзлый грунт можно оценить по эмпирическим формулам [5].

Для параметров самолёта:  $m = 2,1 \cdot 10^5$  кг,  $A = 16,6$  м<sup>2</sup>,  $L_N = 3,5$  м,  $d = 4,6$  м и  $v = 240$  м/с получаем:  $\Delta m = 13,5$  м,  $\Delta nm \approx 80$  м.

Глубина растрескивания бетона, определённая по выражениям из [6].

Проведённые аналитические расчёты не учитывают деформирование ударника (самолёта), поэтому полученные результаты можно считать «верхней» оценкой глубин внедрения самолёта в преграды.

2. В 1988 г. в Сандийской национальной лаборатории (США) был проведён натуральный эксперимент. Самолёт Фантом (масса

Таблица 1

#### Характеристики материалов преград

Параметр	Глина	Бетон	Гравий	Гранит
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	1900	2200	2150	2700
Модуль упругости, МПа	170	60000	50	75000
Модуль сдвига, МПа	64	24000	19	30000
Коэффициент Пуассона	0,4	0,18	0,3	0,2
Статический предел текучести, МПа	2,9	—	—	—
Статический предел прочности на растяжение, МПа	—	8	—	8
Статический предел прочности на сжатие, МПа	10	70	—	100
Статический предел прочности на сдвиг, МПа	—	10	—	10

20 т) подвергался испытанию на фронтальное столкновение с преградой на скорости  $v = 215$  м/с [6]. Преграда представляла собой железобетонную плиту массой 470 т, установленную на аэростатических подшипниках.

В результате удара самолёта преграда сдвинулась на 1,83 м. Практически на всей передней поверхности преграды зафиксированы трещины с максимальной глубиной выкрашивания около 60 мм.

По результатам эксперимента был сделан вывод, что 94 % кинетической энергии самолёта Фантом затрачено на его собственное разрушение, и только 6% – на разрушение преграды.

### 3. Аварии самолётов

Результаты падений различных самолётов (глубины воронок или борозд в грунте) по некоторым данным из открытых источ-

ников приведены в табл. 2.

В последнем столбце таблицы указана величина кинетической энергии самолёта при подлёте к преграде, рассчитанная по формуле:

$$K = mv^2/2. \quad (1)$$

На графике зависимости  $K(\Delta)$ , см. рис. 3, полученные значения приведены в виде маркеров.

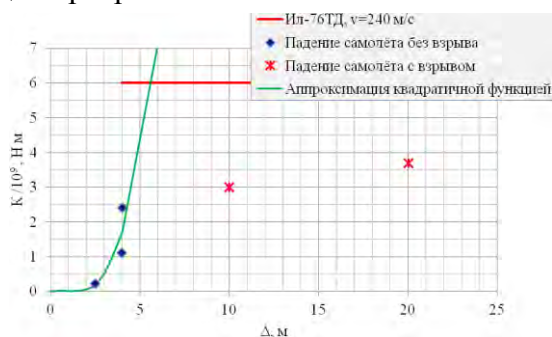


Рис. 3. Зависимость кинетической энергии самолёта от глубины внедрения в грунт

Таблица 2

Данные по падениям различных самолётов из открытых источников

Самолёт (масса)	Условия аварии	Глубины воронок (борозд) в грунте $\Delta$ , м	Кинетическая энергия самолёта при ударе, Н·м
Ту 154 (104 т)	Иран, 2009 г. Самолёт в результате отказа двигателя упал с высоты около 10 км и в момент удара о землю взорвался	10	$3,0 \cdot 10^9$
Су 24 (33,5 т)	Хабаровск, 2015 г. Самолёт на этапе взлёта врезался в землю на скорости около 470 м/с и взорвался	около 20	$3,7 \cdot 10^9$
Ан 22 (200 т)	Тула, 2010 г. Самолёт в результате отказа рулевого управления упал в лес. Скорость при ударе – около 104 м/с	около 4, диаметр воронки – 22 м	$1,1 \cdot 10^9$
Истребитель МиГ-15- самолёт Ю. Гагарина (6 т)	Московская область, г. Щелково, 1968 г. Самолёт упал с высоты около 5 км, под углом $40^\circ$ врезался в землю на скорости около 190 м/с	2,5, диаметр воронки – 6 м	$2,2 \cdot 10^8$
Истребитель МиГ-29 (29.7 т)	Московская область, с. Воскресенск, 2014 г. Самолёт упал в песчаный грунт, скорость столкновения – около 400 м/с	4 м, длина борозды 12 м	$2,4 \cdot 10^9$

Анализ данных расчётов, эксперимента и аварий позволяет сделать вывод, что при столкновении самолёта с грунтом глубина внедрения может превышать 4 м, при ударе самолёта о бетонную преграду ожидается её растрескивание без значительных внедрений.

## Результаты численных расчётов

Первый расчётный случай – фронтальное столкновение самолёта с преградой из бетона со скоростью 240 м/с. На рис. 4 показано деформированное состояние КЭМ самолёта с упаковками на борту на различные моменты времени.

Прежде всего, происходит смятие и разрушение носовой части самолёта, затем деформирование цилиндрической части фюзеляжа и грузового отсека, далее к процессу контакта с преградой подключаются крылья. В результате удара о преграду самолёт полностью разрушается. В грузовом отсеке первой сминается деревянная коробка с документацией. Далее происходит обрыв элементов крепления упаковок и их взаимодействия между собой и с элементами самолёта. Максимальное ускорение упаковок (цен-

тра масс) достигает  $150 \text{ мм/мс}^2$  ( $1,5 \cdot 10^4 \text{ ед.}$ ), см. рис. 5.

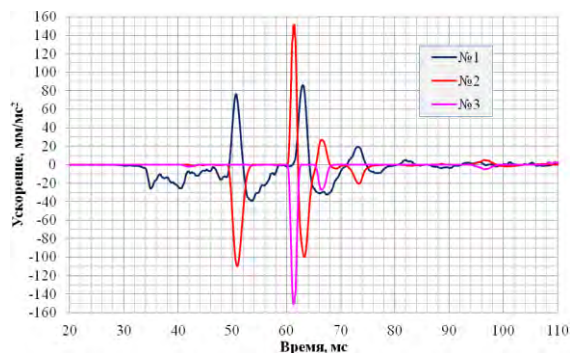


Рис. 5. Графики изменения ускорений упаковок при ударе самолёта о бетонную преграду

Аналогичные расчёты были проведены для случаев, когда материалом преграды являются глина, гранит или гравий. Результаты расчётов приводятся в табл. 3.

По результатам расчётов фронтального столкновения самолёта с преградами из различных материалов со скоростью 240 м/с сделаны следующие выводы:

- минимальные величины перегрузок на упаковках, транспортируемых в самолёте (от 5600 до 8800 ед.), максимальные глубины внедрений в преграду (от 6 до 8,5 м) и длительности импульсов ( $\tau = 4 \text{ мс}$ ) реализуются при ударе самолёта о преграду из глины или гравия;

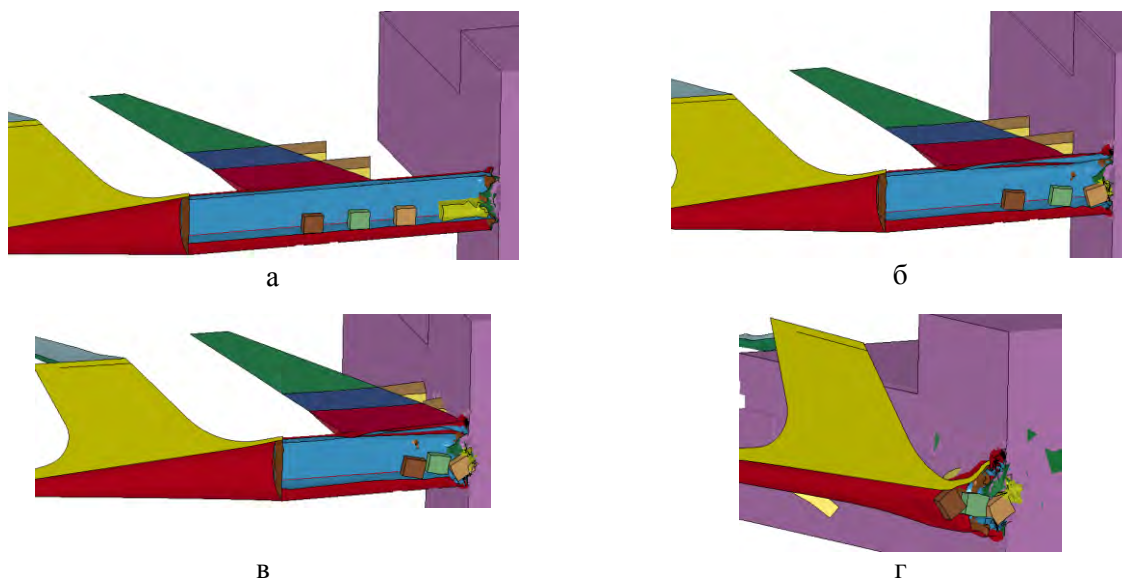


Рис. 4. Фронтальное столкновение самолёта с бетонной преградой,  $v=240 \text{ м/с}$ : а –  $t = 14 \text{ мс}$ ; б –  $t = 44 \text{ мс}$ ; в –  $t = 60 \text{ мс}$ ; г –  $t = 140 \text{ мс}$

Результаты расчётов фронтального удара самолёта Ил-76ТД  
о преграды из различных материалов

Расчётный параметр	Глина	Бетон	Гравий	Гранит
Перегрузка на упаковке № 1, ед.	5600	12000	5800	6200
Перегрузка на упаковке № 2, ед.	8300	15000	7300	9200
Перегрузка на упаковке № 3, ед.	8800	12000	6000	14000
Длительность импульса, мс	4	3	4	3
Глубина внедрения в преграду, м	8,5	2	6	1,5

– максимальные величины перегрузок на упаковках, достигающие  $1,5 \cdot 10^4$  ед., ожидаются при столкновении самолёта с преградой из бетона или гранита. При этом реализуется минимальная длительность импульса ( $\tau = 3$  мс) и глубина внедрения в преграду (от 1,5 до 2 м).

**Анализ результатов расчётов**

Результаты численных расчётов представлены в виде маркеров на графике зависимости максимальной перегрузки на упаковках в самолёте от глубины внедрения самолёта в преграду (см. рис. 6).

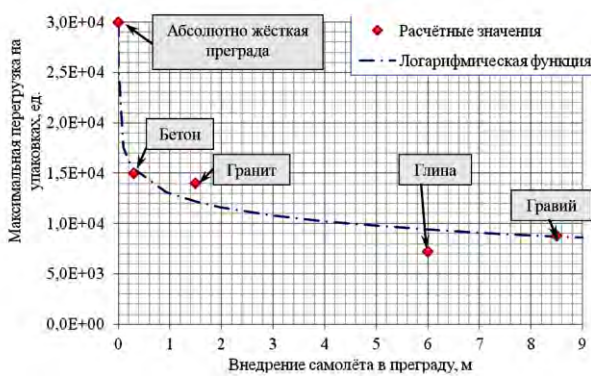


Рис. 6. График зависимости максимальной перегрузки на упаковках от глубины внедрения самолёта в преграду

График зависимости максимальной перегрузки на упаковках в самолёте от глубины внедрения самолёта в преграду  $n^{max}(\Delta)$

представляет собой убывающую функцию, которую на участке  $\Delta$  от 0,0002 до 8,5 м можно представить в виде логарифмической зависимости –

$$n^{max} = -2 \cdot 10^3 \cdot \ln(\Delta) + 1,3 \cdot 10^4. \quad (2)$$

Графики зависимостей максимальной перегрузки на упаковках от времени  $n^{max}(t)$ , полученные по результатам настоящих расчётов и из работы [1], приведённые к одному моменту достижения максимума, приводятся на рис. 7.

Площади под кривыми  $n^{max}(t)$  при переходе к зависимости силы от времени  $F(t)$  представляют собой величины импульсов силы (N), действующих на упаковки в процессе аварийного столкновения самолёта с преградой

$$N = \int_{t_1}^{t_2} F(t) dt \quad (3)$$

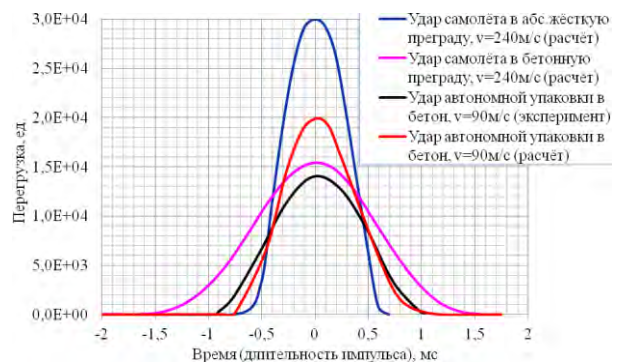


Рис. 7. График зависимости максимальной перегрузки на упаковках от длительности ударного импульса

Интегрированием кривых  $F(t)$  были получены величины импульсов, действующих на упаковки:

– при столкновении самолёта со скоростью 240 м/с с абсолютно жёсткой преградой –  $N_{сж} = 4,33 \cdot 10^5$  Н·с;

– при столкновении самолёта со скоростью 240 м/с с преградой из бетона –  $N_{сб} = 4,20 \cdot 10^5$  Н·с;

– при столкновении автономной упаковки в бетонную преграду –  $N_{аб} = 3,3 \cdot 10^5$  Н·с.

Сравнение величин импульсов, действующих на упаковки, позволяет сделать следующие выводы:

– максимальная величина перегрузки, действующая на упаковки в самолёте, достигает  $1,5 \cdot 10^4$  ед. в случае столкновения самолёта с бетонной или гранитной преградой. Если преграда представляет собой гравий или глину величина перегрузки не превышает  $9 \cdot 10^3$  ед.;

– величины импульсов, действующих на упаковку в самолёте при фронтальном столкновении с преградой на скорости 240 м/с в случае абсолютно жёсткой преграды и бетонной преграды отличаются незначительно (на 4%). Но увеличение длительности импульса способствует снижению амплитуды ускорения в 2 раза (в случае преграды из бетона) и более (в случае преграды из гравия или глины);

– величина максимальной перегрузки, действующая на автономную упаковку при её ударе со скоростью  $v = 90$  м/с о бетонную преграду, ( $1,4 \cdot 10^4$  ед.) близка соответствующей величине перегрузки на упаковке в самолёте при  $v = 240$  м/с ( $1,5 \cdot 10^4$  ед.). При этом величина импульса силы, действующего на упаковку, в последнем случае за счёт большей длительности выше на 20 %.

### Выводы по проведённым расчётам

На основании ранее разработанной и верифицированной конечно-элементной модели самолета Ил-76ТД рассмотрены задачи фронтального столкновения самолета с

упаковками на борту на скорости 240 м/с с преградой из различных материалов.

По результатам расчётов сделаны следующие выводы:

- учёт реальных свойств преграды существенно влияет на уровень нагруженности упаковок, что обусловлено увеличением длительности действующего на упаковки ударного импульса;

- максимальная величина перегрузки на упаковках достигает  $n^{\max} = 1,5 \cdot 10^4$  ед. в случае фронтального столкновения самолета с массивной преградой из бетона или гранита. Если преграда представляет собой гравий или глину величина перегрузки не превышает  $9 \cdot 10^3$  ед.;

- величина максимальной перегрузки, действующая на автономную упаковку при её ударе со скоростью  $v = 90$  м/с о бетонную преграду ( $1,4 \cdot 10^4$  ед.), близка соответствующей величине перегрузки на упаковке в самолёте при  $v = 240$  м/с ( $1,5 \cdot 10^4$  ед.). При этом величина импульса силы, действующего на упаковку, в последнем случае выше на 20% за счёт большей длительности.

### Список использованных источников

1. Жабунина О. Ю., Натыньчик Н. М., Никульшин М. В., Путилин О. С. Оценка нагруженности упаковок с грузами при транспортной аварии самолёта Ил-76: Доклад на XV сессии отраслевой молодёжной школы-семинара «Промышленная безопасность и экология». – ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2015 г.
2. Справочник физических констант горных пород. – М., Изд-во «Мир», 1969. – 542 с.
3. Бульчѳв Н. С. Механика подземных сооружений. – М., Изд-во «Недра», 1994. – 382 с.
4. ГОСТ 26633-91. Бетоны тяжѳлые и мелкозернистые. Технические условия. – М., 2001.
5. Численное моделирование процессов нормального удара и проникания осесимметричного тела в мѳрзлый грунт: Е. Г. Глазова и др. – НИИМ НГУ. – Механика тѳвѳрого тела, № 5, 2015.
6. Экстремальные воздействия на сооружения. А. Н. Бирбраер, А. Ю. Роледер. – СПб.: Атомѳнергопроект, 2009.– 600 с.