

Моделирование испытаний макетов транспортных упаковочных комплектов на ударное воздействие двигателя падающего самолета. Часть 1

© А.Г. Казанцев¹, В.В. Абрамов¹, О.М. Петров¹, М.В. Радченко²

¹АО «НПО «ЦНИИТМАШ», Москва, 115628, Российская Федерация

²АО «Атомспецтранс», Москва, 129085, Российская Федерация

Приведены результаты исследования напряженно-деформированного состояния и прочности транспортных упаковочных комплектов (ТУК) при имитационных испытаниях на ударное воздействие двигателя падающего самолета. В части 1 статьи изложена методика моделирования ударного воздействия и определены параметры бояка, обеспечивающего удар по ТУК, который эквивалентен удару двигателя самолета. Установлены закономерности изменения ударного импульса, скоростей деформаций и напряженно-деформированного состояния при изменении масштаба макетов ТУК. Показано, что расчетные оценки последствий удара согласуются с результатами испытаний макетов ТУК, изготовленных в масштабе 1:2,5 и 1:10. Максимальные деформации корпуса ТУК, возникающие при ударе, не превышают предельных разрушающих деформаций материала корпуса — стали 09Н2МФБА-А, что обеспечивает сохранение его целостности при ударе в условиях низких климатических температур.

Ключевые слова: транспортный упаковочный комплект, удар самолета, ударный импульс, скорость деформации, динамическая пластичность

Введение. В число анализируемых аварий при хранении транспортных упаковочных комплектов (ТУК) с отработавшим ядерным топливом (ОЯТ) на открытой площадке входит такое внешнее событие, как удар самолета со скоростью 215 м/с [1–4]. Поскольку натурные испытания ТУК на такой вид воздействия сопряжены со значительными техническими трудностями, обоснование целостности и герметичности проводят на уменьшенных макетах, технология изготовления которых, материалы, а также функциональные свойства комплектующих идентичны используемым в натурном изделии.

Цель работы — разработка на основе численного моделирования методики имитационных испытаний макетов ТУК при ударном воздействии двигателя падающего самолета.

Предмет исследований. Рассматривается удар бояка — имитатора двигателя истребителя-бомбардировщика Phantom RF-4E по ТУК для обращения с облученными тепловыделяющими сборками (ОТВС) реакторной установки БРЕСТ-ОД-300 (реактора на быстрых нейтронах со свинцовым теплоносителем). Внешний вид ТУК (с разрезом) и его конструкция показаны на рис. 1.

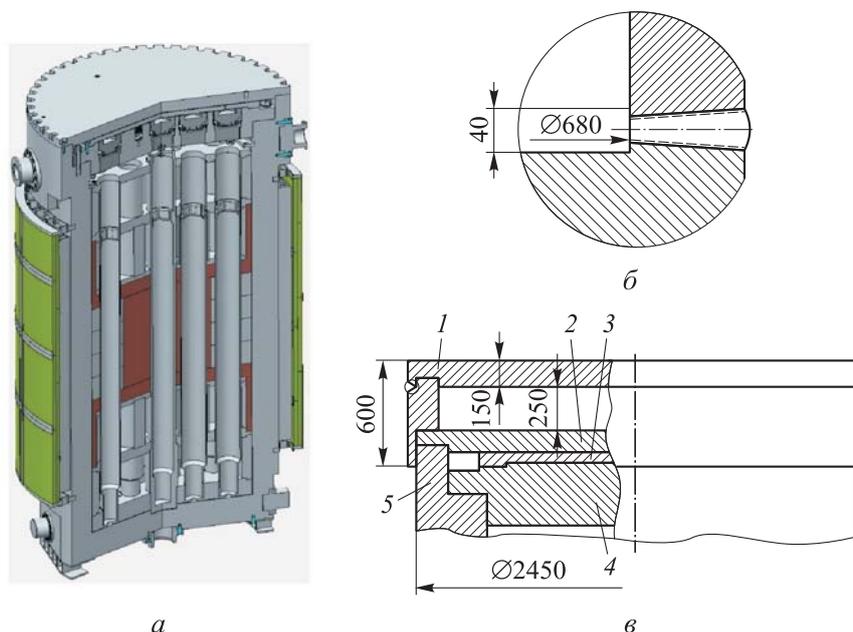


Рис. 1. Транспортный упаковочный комплект:

a — внешний вид ТУК; *б* — сварное соединение днища с обечайкой; *в* — схема установки защитного колпака на макет ТУК; 1 — колпак защитный; 2 — крышка наружная; 3 — крышка промежуточная; 4 — крышка защитная; 5 — корпус

Корпус ТУК состоит из сваренных между собой с использованием электрода ЭА-395/9 толстостенной обечайки и днища из поковок стали 09Н2МФБА-А, разработанной в НПО «ЦНИИТМАШ». К наружной поверхности обечайки приварены ребра охлаждения и прикреплены элементы нейтронной защиты из борированного полиэтилена. Во внутреннем чехле размещены трубы ОТВС. Внутренняя и наружная крышки ТУК установлены на шпильки, которые затягиваются к корпусу контейнера гайками, герметичность обеспечивается уплотнениями.

Высота корпуса ТУК — 5 м, внешний диаметр (без ребер охлаждения и нейтронной защиты) — 2,5 м, толщина стенки — 250 мм, толщина днища — 300 мм, масса с загруженными ОТВС — около 130 т. Толщина стенок корпуса выбрана исходя из требований радиационной безопасности.

При хранении ТУК на открытой площадке на него устанавливается изготовленный из стали 09Г2С защитный колпак, который состоит из цилиндрической обечайки и плоской крышки, соединенных сварным швом (см. рис. 1, *в*). Обечайка опирается на края наружной крышки, в результате чего при ударе по колпаку силовое воздействие передается на торец корпуса ТУК. Крышка колпака выполняет роль амортизатора, поглощающего часть энергии удара вследствие пластической деформации.

На основе предварительных расчетов и опыта проведения аналогичных испытаний установлено, что удар по ТУК фюзеляжа самолета менее жесткий, чем удар двигателем [5], поэтому при проведении расчетов и испытаний моделировался удар двигателем. Принятая в расчетах масса бойка — имитатора двигателя — составляет 1,46 т, пятно удара — круг диаметром 0,76 м [6], что близко к значениям соответствующих параметров двигателя истребителя-бомбардировщика Phantom RF-4E.

Поскольку удар оказывает достаточно локальное воздействие на корпус ТУК, область максимальных напряжений может приходиться как на зону, в которой имеются технологические дефекты, так и на бездефектный металл. В части 1 статьи рассматриваются последствия удара в предположении отсутствия технологических дефектов в зоне удара.

Моделирование ударного воздействия. Расчет возникающего при ударе напряженно-деформированного состояния корпуса ТУК выполнялся с помощью метода конечных элементов (МКЭ). Учет влияния скорости деформирования на свойства материалов проводился с использованием уравнения Купера — Саймондса. В соответствии с данным соотношением связь между диаграммами деформирования при статическом и при динамическом нагружении определяется интенсивностью пластической деформации и ее скоростью. Указанная зависимость имеет вид

$$\sigma_i(\varepsilon_i^p, \varepsilon_i'^p) = \sigma_i(\varepsilon_i^p) \left[1 + (\varepsilon_i'^p / c)^{1/\rho} \right], \quad (1)$$

где $\sigma_i(\varepsilon_i^p, \varepsilon_i'^p)$ — кривая деформирования при динамическом нагружении (σ_i и ε_i^p — интенсивность напряжений, МПа, и интенсивность пластических деформаций соответственно; $\varepsilon_i'^p$ — скорость интенсивности пластических деформаций, c^{-1}); $\sigma_i(\varepsilon_i^p)$ — кривая деформирования при статическом нагружении; c и ρ — параметры (c имеет размерность c^{-1} , ρ — безразмерный).

Используемые в расчетах характеристики деформирования и разрушения материалов определялись на стандартных образцах и плоских мишенях разной толщины в условиях, близких к реализуемым при испытаниях ТУК.

Свойства металла корпуса ТУК (сталь 09Н2МФБА-А), металла макета двигателя (сталь 20) и металла колпака (сталь 09Г2С) при температуре $T = 20$ °С приведены в табл. 1.

При моделировании рассматривались лобовые удары, оказывающие более интенсивное воздействие на ТУК, чем наклонные [7, 8].

Расчетные механические характеристики материалов

Марка стали	Статический предел текучести, МПа	Модуль упругости, МПа	Параметры уравнения Купера — Саймондса	
			c	ρ
09Н2МФБА-А	280	50	80	12
Ст. 20	240	340	10^4	10
09Г2С	180	50	80	12

При выборе конструкции бойка использовались данные по ударному импульсу, полученному в краш-тесте при ударе натурального двигателя со скоростью 215 м/с о жесткую стенку [7, 9]. Параметры бойка, который создает аналогичный ударный импульс, подбирались путем проведения серии расчетов МКЭ с варьированием жесткости бойка при фиксированных массе и диаметре [10].

Конструкция бойка с одним задним доньшком и податливой передней частью позволила получить близкую форму ударного импульса (рис. 2, а).

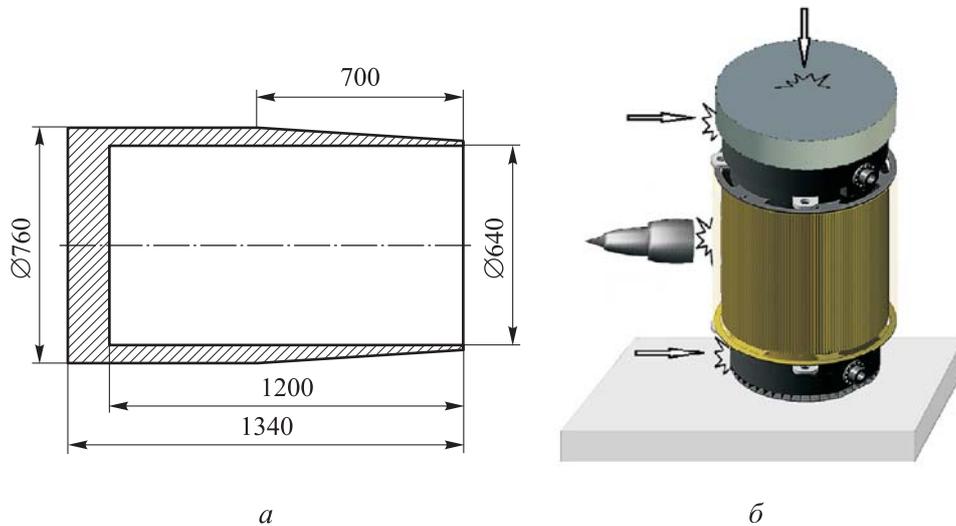


Рис. 2. Конструкция бойка (а) и схема направления ударов бойка по ТУК (б)

Форма ударных импульсов при ударе двигателя о плоскую жесткую стенку по данным краш-теста (кривая 1 [7]), расчетного ударного импульса при ударе бойка о жесткую стенку (кривая 2) и боковую поверхность ТУК на уровне центра масс (кривая 3) приведена на рис. 3. На рис. 3 а, б показаны также ударные импульсы, полученные для макетов ТУК различного масштаба.

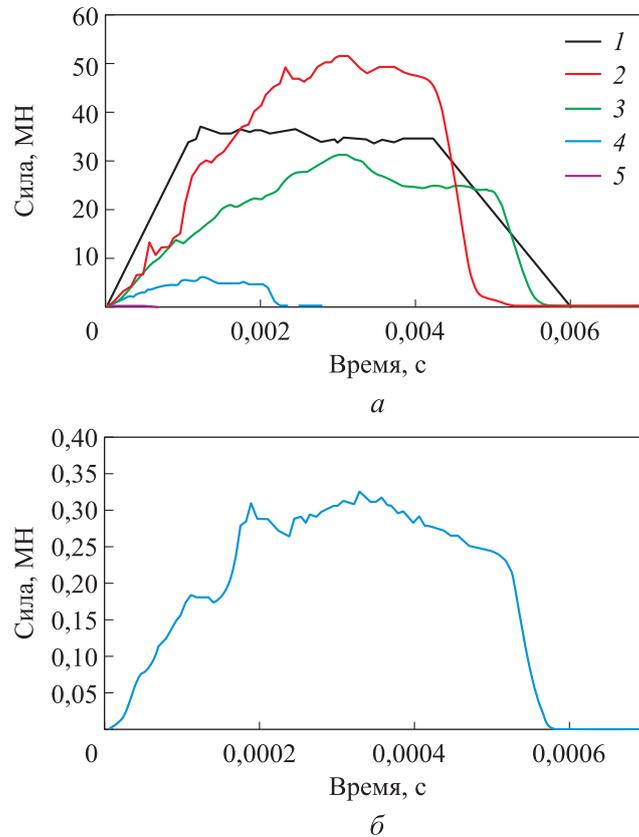


Рис. 3. Форма импульсов при ударе о жесткую стенку (результаты краш-теста) и макеты ТУК различного масштаба:

а: 1 — удар полномасштабного двигателя по жесткой стенке; 2 — удар бойка (масштаб 1:1) по жесткой стенке; 3 — удар бойка по макету ТУК в масштабе 1:1; 4 — удар бойка по макету в масштабе 1:2; 5 — удар по макету в масштабе 1:10; *б* — то же в увеличенном виде

При сопоставлении кривых 1–3 видно, что при ударе бойком по плоской жесткой стенке амплитуда ударного импульса несколько выше, чем в краш-тесте, что обеспечивает консервативность оценок последствий удара. Удар по цилиндрической боковой поверхности ТУК менее жесткий, чем удар по плоской жесткой стенке.

При проведении расчетов также моделировались боковые удары по нижней части (зоне сварного соединения днища с обечайкой), верхней части и колпаку (рис. 2, б). Рассматривался удар по свободно стоящему ТУК и при его опирании задней боковой поверхностью о жесткую стенку. Полученные результаты показали, что наиболее высокие напряжения в обечайке ТУК возникают при ударе двигателя самолета в боковую поверхность макета ТУК на уровне центра тяжести.

При наличии упора напряжения в стенке ТУК в зоне удара повышаются примерно на 10 %, причем в этом случае происходит двойной удар — удар бойка по ТУК и удар ТУК в стенку. Приведенные ниже результаты получены для варианта удара с наличием упора.

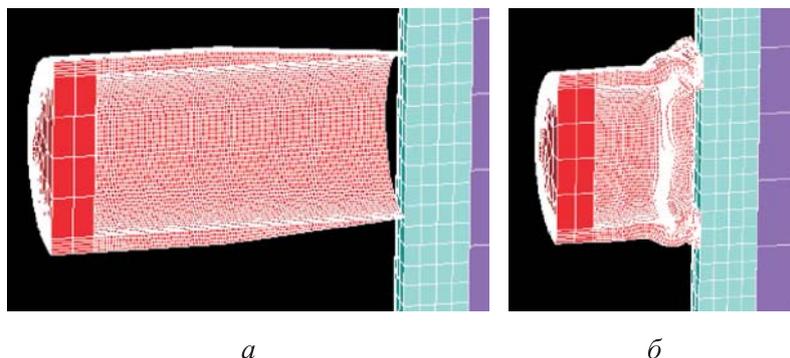


Рис. 4. Форма бойка в начальный момент (а) и после удара (б)

Изменение формы бойка при ударе в стенку корпуса ТУК (масштаб 1:1) показано на конечно-элементных моделях (рис. 4).

Распределение интенсивности пластических деформаций представлено на рис. 5, а, главных растягивающих напряжений при боковом ударе по ТУК на уровне центра тяжести — на рис. 5, б, а также при боковом ударе в верхнюю и нижнюю часть корпуса — соответственно на рис. 5, в, г. На наружной поверхности в зоне контакта бойка со стенкой ТУК происходит локальное пластическое деформирование, основной объем обечайки деформируется упруго. В зоне удара у внутренней поверхности обечайки, в области, примерно в 2 раза превосходящей диаметр бойка, возникают высокие растягивающие окружные напряжения, распределение которых по толщине стенки для макетов различного масштаба показано на рис. 6. Максимальная величина окружных напряжений достигает примерно 460 МПа. При ударе бойка в зону шва и верхнюю часть ТУК (см. рис. 5 в, г) максимальные напряжения существенно ниже. В зоне сварного шва они не превышают 200 МПа.

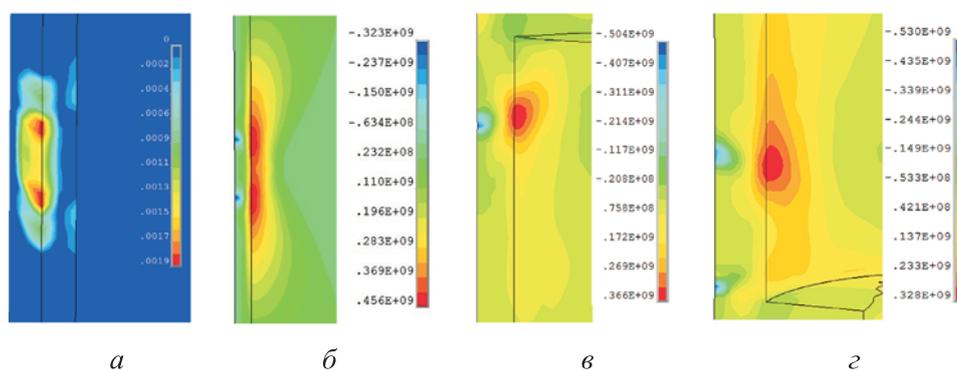


Рис. 5. Распределение интенсивности пластических деформаций (а) и главных растягивающих напряжений (Па, $t = 3$ мс) при боковом ударе на уровне центра тяжести (б), ударе в верхнюю (в) и нижнюю (г) часть корпуса ТУК

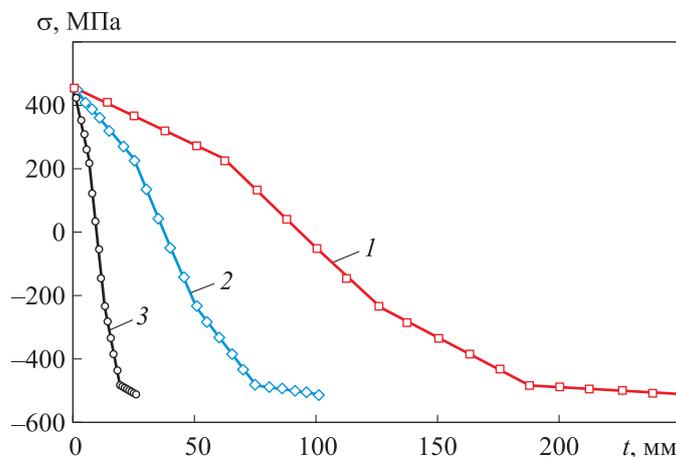


Рис. 6. Распределение окружных напряжений в зоне удара по стенке макетов ТУК различного масштаба:
 1 — 1:1; 2 — 1:2,5; 3 — 1:10

Как видно на рис. 6, с уменьшением размеров макета уровень максимальных напряжений не изменяется, но увеличивается градиент напряжений по толщине стенки. Для распределения компонент напряжений по толщине выполняется условие подобия

$$\sigma(t) = \sigma(t/n), \tag{2}$$

где t — расстояние, отсчитываемое от внутренней поверхности стенки; n — масштабный коэффициент.

Пересчитанные с использованием (2) значения напряжений для макетов в масштабе 1:10 и 1:2,5 ложатся на одну кривую, соответствующую натурному ТУК (кривая 3 на рис. 6).

Полученные расчетом параметры ударных импульсов в зависимости от масштаба модели ТУК и бойка приведены в табл. 2.

Таблица 2

Параметры удара по ТУК различного масштаба

Масштаб макета	Масса бойка, кг	Масса макета ТУК, кг	Толщина стенки корпуса ТУК, мм	Амплитуда импульса, МН	Длительность импульса, с
1:1	1460	130 000	250	32	0,0057
1:2,5	93,4	8 320	100	5,5	0,00227
1:10	1,46	130	25	0,32	0,00057

Из анализа данных табл. 2 следует, что при изменении линейных размеров в масштабе $1:n$ масса макетов бойка и ТУК уменьшается в n^3 раз, пиковое значение усилия — в n^2 раз, величина длительности импульса — в n раз, а скорость относительных деформаций увеличивается в n раз.

На основе МКЭ-моделирования были также определены параметры защитного колпака, предохраняющего крышку ТУК от вертикального удара. Толщина крышки колпака составляет 150 мм, зазор между крышкой колпака и крышкой ТУК — 250 мм (см. рис. 1, в).

Результаты расчета остаточных вертикальных перемещений и интенсивности пластических деформаций, возникающих при ударе бойка в центральную часть колпака натурального ТУК, приведены на рис. 7.

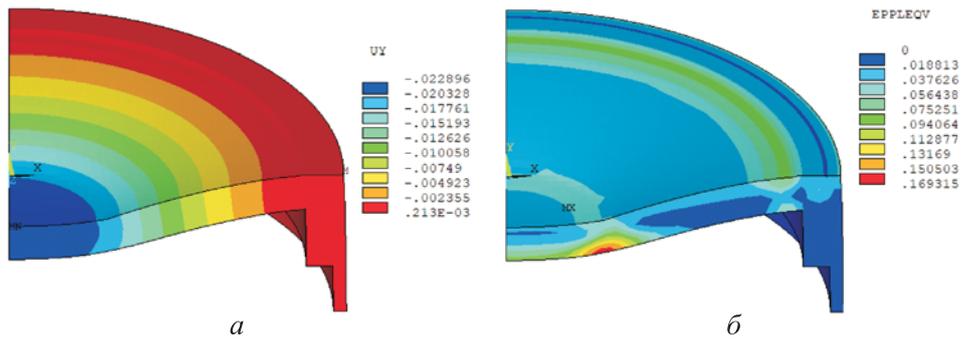


Рис. 7. Остаточные вертикальные перемещения, м, (а) и пластические деформации (б) в защитном колпаке после удара

При моделировании удара бойка по колпаку на макетах ТУК влияние масштабного эффекта на параметры ударного импульса и напряженно-деформированное состояние в зоне удара аналогично полученному при боковом ударе по корпусу ТУК (табл. 3). Величина остаточного прогиба крышки колпака изменяется примерно пропорционально изменению масштаба и не превышает зазор между крышкой колпака и крышкой макета ТУК.

Таблица 3

Результаты расчета параметров удара по колпаку на макетах ТУК различного масштаба

Масштаб макета	Масса бойка, кг	Толщина крышки колпака, мм	Длительность импульса, с	Максимальная деформация колпака, %	Остаточный прогиб крышки колпака, мм
1:1	1460	150	0,0075	16,4	250
1:2,5	93,4	60	0,003	15,0	98
1:10	1,46	15	0,0007	14,0	22,9

Методика испытаний. Сопоставление экспериментальных и расчетных данных. С использованием результатов МКЭ-моделирования были изготовлены боек и колпак и проведены испытания макета ТУК в масштабе 1:2,5 на удар двигателем самолета. Испытания проводились на полигоне ФГУП «РФЯЦ ВНИИГЭФ» [11]. Технологическое

исполнение макета в масштабе 1:2,5 воспроизводило материальную спецификацию всех основных элементов полноразмерного ТУК, важных для подтверждения параметров его безопасности. Расположение центра масс соответствовало расположению у полноразмерного ТУК. Макет (масса около 12 т, диаметр 1 м, высота 2 м) был изготовлен на основе базовой технологии с соблюдением всех требований к качеству, которые предъявляются к серийным ТУК.

Боек — имитатор двигателя — на разгонной каретке посредством реактивных пороховых двигателей разгонялся до скорости 215 м/с по монорельсу реактивно-катапультирующей установки (рис. 8, а). Для повышения устойчивости на передней части бойка была установлена тонкостенная заглушка. Масса бойка, равная 115 кг, была несколько превышена относительно расчетной — 93,4 кг. После бокового удара по ТУК деформаций корпуса не выявлено. Сквозные повреждения получила нейтронная защита, наблюдались локальные разрушения ребер охлаждения.



а



б



в

Рис. 8. Боек на разгонной каретке (*а*); макет ТУК в масштабе 1:2,5 после бокового удара бойка (*б*) и после удара по защитному колпаку (*в*)

При ударе бойком по защитному колпаку прогиб крышки колпака составил 132 мм при расчетной величине 125 мм (для бойка массой 115 кг). Разрушений и потери герметичности наружной крышки не выявлено. Внешний вид макета ТУК в масштабе 1:2,5 после бокового удара бойка и удара по защитному колпаку продемонстрированы на рис. 8, б, в соответственно. Целостность макета сохранилась, результаты испытаний согласуются с расчетными оценками.

Для испытаний макета ТУК в масштабе 1:10 использовалась пневмопушка (рис. 9, а), длина ствола которой — 4 м, калибр — 80 мм; масса снаряда (бойка) — 1,46 кг, скорость бойка на срезе ствола — 215 м/с. Пневмопушка (устройство пусковое ИСТА-ПУ-12-50-80-ЭСМ) предназначена для разгона метаемых тел энергией сжатого воздуха [12]. В основе ее работы лежит использование быстродействующего клапана, имеющего проходной диаметр 80 мм и работающего при давлении до 100 бар. Быстродействующий клапан, соединенный с ресивером и стволом, установлен на раме. Измерение скорости метаемого тела осуществляется фотоэлектрическим регистратором РС-4М.

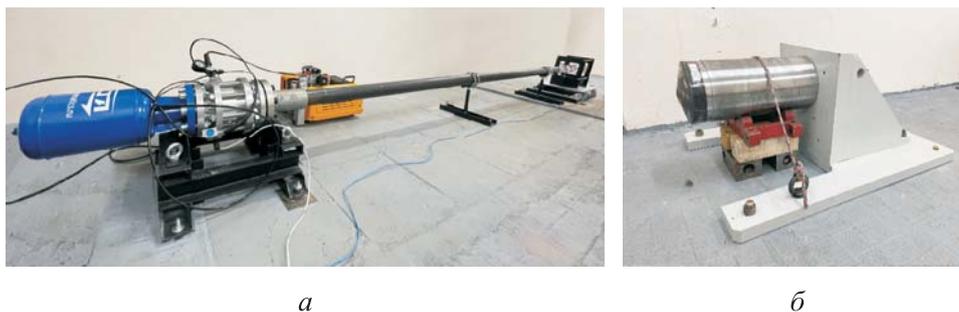


Рис. 9. Пневмопушка (а) и упор с установленным макетом ТУК (б)

При испытании на боковой удар макет ТУК располагался вертикально и боковой поверхностью опирался о жесткий упор массой 500 кг, закрепленный на фундаменте (рис. 9, б). После удара на поверхности корпуса макета вмятина и пластические деформации отсутствовали, общая деформация бойка (усадка) составила 75 мм (рис. 10), что согласуется с результатами расчета.

Для испытаний защитного колпака макет ТУК устанавливался на упор в горизонтальном положении (см. рис. 9, б). Удар бойка со скоростью 215 м/с по колпаку не вызвал разрушение, прогиб в центральной части колпака составил 26 мм, что близко к расчетному, равному 22,5 мм (см. табл. 3).

Для определения динамической пластичности металла корпуса и колпака ТУК были проведены испытания на удар плоских мишеней размерами 300×300 мм разной толщины: 25, 15 и 7,5 мм.

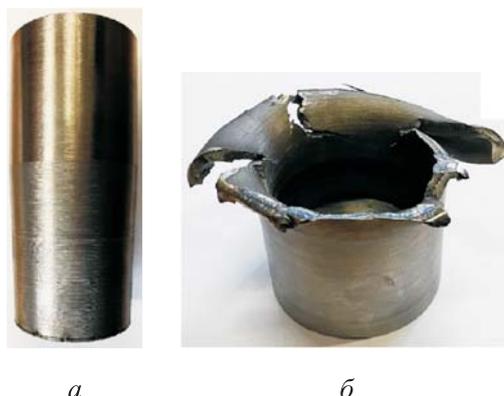


Рис. 10. Внешний вид бойка до удара (а) и после него (б)

Мишени устанавливали на жестком упоре с центральным отверстием диаметром 180 мм (см. рис. 8, б), обеспечивающим возможность сквозного пробивания мишени бойком. Величина интенсивности деформаций оценивалась по изменению размеров ячеек сетки с шагом 5×5 мм, нанесенной на поверхность мишени методом лазерной маркировки [12]. Внешний вид мишеней после испытаний при $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ показан на рис. 11.

При ударе по мишени из стали 09Н2МФБА-А толщиной 25 мм (соответствует толщине стенки макета в масштабе 1:10) на ее поверхности отсутствовали вмятина и заметные пластические деформации, как

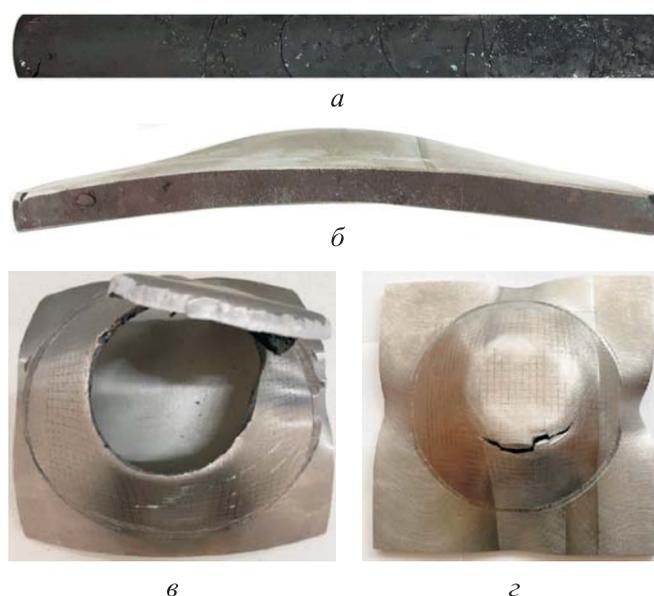


Рис. 11. Внешний вид мишеней после испытаний:

а и б — вид в боковом направлении на мишени из стали 09Н2МФБА-А толщиной 25 мм (а) и 15 мм (б) соответственно; в и г — вид на мишени толщиной 7,5 мм из стали 09Н2МФБА-А (в) и 09Г2С (г) с противоположной от удара стороны

показано на рис. 11, а. Мишень толщиной 15 мм (рис. 11, б) деформировалась без разрушения, прогиб составил 16 мм, максимальная интенсивность пластических деформаций — 13 %.

При ударе по мишеням толщиной 7,5 мм были получены сквозные отверстия. Максимальная величина интенсивности пластических деформаций у зоны разрушения составила 45 % (сталь 09Н2МФБА-А) и 38 % (сталь 09Г2С).

Поскольку хранение ТУК на открытых площадках в районах Крайнего Севера может осуществляться при температуре до $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$, аналогичные испытания по определению динамической пластичности ε_{fd} были выполнены и при пониженной температуре. Мишени охлаждались парами жидкого азота. Результаты испытаний приведены в табл. 4. Значения разрушающих деформаций при температуре $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ (на уровне 30...35 %) оказались ниже, чем при комнатной температуре. Для сопоставления в табл. 4 приведены также значения пластичности ε_f при статическом нагружении, полученные при испытаниях стандартных образцов на растяжение по ГОСТ 1497–84.

Таблица 4

Значения разрушающих деформаций

Марка стали	$T, \text{ }^{\circ}\text{C}$	$\varepsilon_{fd}, \%$	$\varepsilon_f, \%$	$T, \text{ }^{\circ}\text{C}$	$\varepsilon_{fd}, \%$	$\varepsilon_f, \%$	$p, \text{ мишень}$	$p, \text{ ТУК}$
09Н2МФБА-А	+20	45	166	-60	35	161	0,7	0,5
09Г2С	+20	38	139	-60	30	–	0,7	0,75

Как известно, предельная пластичность материала зависит от объемности напряженного состояния, характеризуемой параметром

$$p = \frac{\sigma_i}{\sigma_0},$$

где σ_i — интенсивность напряжений; $\sigma_0 = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) / 3$ — среднее напряжение ($\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ — главные напряжения).

По данным расчета МКЭ показатели объемности напряженного состояния в зоне разрушения мишеней близки к значениям, полученным для ТУК (см. табл. 4), причем в силу подобия напряженно-деформированного состояния параметр p не зависит от масштаба макета ТУК.

Следует также отметить, что скорость деформации при ударах по мишеням по результатам МКЭ-расчетов выше, чем при ударах по натурному ТУК, т. е. полученные данные по динамической пластичности обеспечивают консервативные оценки прочности. Разрушающие деформации, установленные по результатам испытаний

мишеней, значительно выше уровня максимальных пластических деформаций в стенке ТУК и колпаке, возникающих при ударе двигателя самолета, что исключает возможность разрушения (пробоя) ТУК.

Заключение. Разработана конструкция бойка — имитатора двигателя, ударное воздействие которого на корпус ТУК эквивалентно удару натурального двигателя (с верификацией по импульсу, возникающему при ударе о жесткую стенку). Выполнено численное моделирование удара имитатора двигателя истребителя-бомбардировщика Phantom RF-4E по корпусу ТУК из стали 09Н2МФБА-А и защитному колпаку из стали 09Г2С. Проведены испытания на удар бойка со скоростью 215 м/с по мишеням толщиной 25, 15 и 7,5 мм, на основании которых определены разрушающие деформации для стали 09Н2МФБА-А и 09Г2С при комнатной и пониженной до -60 °С температуре. Показано, что в случае удара двигателя самолета целостность ТУК при отсутствии технологических дефектов в зоне удара сохраняется.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] External human-induced events in site evaluation for nuclear power plants. *IAEA Safety Standards Series. Safety Guide No. NS-G-3.1*. International Atomic Energy Agency. Vienna, 2002. 49 p.
- [2] Gerald C.M., Roger W.C., Stephen C.L., Larry E.F. *Guidelines for Conducting Impact Tests on Shipping Packages for Radioactive Material*. Department of Energy by Lawrence Livermore National Laboratory, 1995, 103 p.
- [3] Shirai K., Namba K., Saegusa T. Safety analysis of dual-purpose metal cask subjected to impulsive loads due to aircraft engine crash. *Journal of Power and Energy Systems*, 2009, vol. 3 (1), pp. 72–82. <https://doi.org/10.1299/jpes.3.72>
- [4] Almomani B., Jang D., Lee S., Kang H.G. Development of a probabilistic safety assessment framework for an interim dry storage facility subjected to an aircraft crash using best-estimate structural analysis. *Nuclear Engineering and Technology*, 2017, vol. 49 (2), pp. 411–425. <https://doi.org/10.1016/j.net.2016.12.013>
- [5] Marchaud G., Vilela L., Nallet S. Designing a radioactive material storage cask against airplane crashes with LS-DYNA. In: *Proc. of 13th International LS-Dyna Users Conference*, 2016, pp. 68–74.
- [6] Курындин А.В., Киркин А.М., Каримов А.З., Лось В.А. О подходах к расчетному моделированию испытаний ТУК на ударное воздействие при падении самолета. *Вопросы атомной науки и техники. Серия материаловедение и новые материалы*, 2022, вып. 4 (115), с. 37–50.
- [7] Бирбраер А.Н., Роледер А.Ю. *Экстремальные воздействия на сооружения*. Санкт-Петербург, Изд-во Политехн. ун-та, 2009, 600 с.
- [8] Велданов В.А., Дудик Д.Е., Максимов М.А., Федоров С.В., Козлов В.С. Влияние угла атаки на проникание удлиненных ударников. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, вып. 1 (13). URL: <https://engjournal.bmstu.ru/catalog/machin/blasting/572.html>
- [9] Sugano T., Tsubota H., Kasai Y., Koshika N. Full-scale aircraft impact test for evaluation of impact force. *Nuclear Engineering and Design*, 1993, vol. 140, iss. 3, pp. 373–385.

- [10] Казанцев А.Г., Радченко М.В., Петров О.М., Орлов В.В., Абрамов В.В., Кахадзе Т.Ж. Определение параметров метаемого тела при имитационных испытаниях на удар самолета транспортных упаковочных комплектов. *Тяжелое машиностроение*, 2023, № 7–8, с. 15–24.
- [11] Абрамов В.В., Казанцев А.Г., Петров О.М., Бучельников А.Е., Кочура И.А., Кравченко В.П., Седов Р.С., Таусенев В.В., Радченко М.В., Харин М.В. Испытания макета транспортного упаковочного комплекта. *Атомная энергия*, 2023, т. 134, № 3–4, с. 164–169.
- [12] Григорьев В.В., Исаков С.Н., Петров Р.Л., Юркин С.В. Газодинамическое исследование пневматического линемета. *Журнал технической физики*, 2006, т. 76, № 3, с. 75–81.
- [13] Дель Г.Д., Новиков Н.А. *Метод делительных сеток*. Москва, Машиностроение, 1979, 143 с.

Статья поступила в редакцию 20.08.2024

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Казанцев А.Г., Абрамов В.В., Петров О.М., Радченко М.В. Моделирование испытаний макетов транспортных упаковочных комплектов на ударное воздействие двигателя падающего самолета. Часть 1. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2025, вып. 1. EDN ZFSUEB

Казанцев Александр Георгиевич — д-р техн. наук, профессор, заведующий отделом прочности АО «НПО «ЦНИИТМАШ». e-mail: agkazantsev@cniitmash.com

Абрамов Владимир Владимирович — старший научный сотрудник АО «НПО «ЦНИИТМАШ». e-mail: vvabramov@cniitmash.com

Петров Олег Максимович — канд. техн. наук, старший научный сотрудник АО «НПО «ЦНИИТМАШ». e-mail: ompetrov@cniitmash.com

Радченко Михаил Владимирович — канд. техн. наук, ведущий специалист АО «Атомспецтранс». e-mail: mvr@nuclearcask.ru

Simulation testing of the shipping package mock-ups under the impact of a falling aircraft engine. Part 1

© A.G. Kazantsev¹, V.V. Abramov¹, O.M. Petrov¹, M.V. Radchenko²

¹JSC “NPO “TSNIITMASH”, Moscow, 115628, Russian Federation

²JSC “Atomspectrans”, Moscow, 129085, Russian Federation

The paper presents results of studying the shipping packages (SP) stress-strain state and strength during simulation testing against the falling aircraft engine impact. Part 1 of the paper identifies methodology in simulating the impact and defines the striker parameters impacting the SP equivalent to the aircraft engine impact. The paper establishes patterns of alterations in the impact pulse, strain rates and stress-strain state with a change in the SP model scale. It shows that the computed assessment of the impact consequences is consistent with results of testing the SP models manufactured at the 1:2.5 and 1:10 scales. The SP body maximum deformations appearing during an impact do not exceed the ultimate destructive deformations of the body material, i.e., the 09N2MFBA-A steel, which ensures preservation of its integrity during an impact in the low climatic temperatures.

Keywords: shipping package, aircraft impact, impact pulse, strain rate, dynamic plasticity

REFERENCES

- [1] External human-induced events in site evaluation for nuclear power plants. *IAEA Safety Standards Series. Safety Guide No. NS-G-3.1*. International Atomic Energy Agency, Vienna, 2002, 49 p.
- [2] Gerald C.M., Roger W.C., Stephen C.L., Larry E.F. *Guidelines for Conducting Impact Tests on Shipping Packages for Radioactive Material*. Department of Energy by Lawrence Livermore National Laboratory, 1995, 103 p.
- [3] Shirai K., Namba K., Saegusa T. Safety analysis of dual-purpose metal cask subjected to impulsive loads due to aircraft engine crash. *Journal of Power and Energy Systems*, 2009, vol. 3 (1), pp. 72–82. <https://doi.org/10.1299/jpes.3.72>
- [4] Almomani B., Jang D., Lee S., Kang H.G. Development of a probabilistic safety assessment framework for an interim dry storage facility subjected to an aircraft crash using best-estimate structural analysis. *Nuclear Engineering and Technology*, 2017, vol. 49 (2), pp. 411–425. <https://doi.org/10.1016/j.net.2016.12.013>
- [5] Marchaud G., Vilela L., Nallet S. Designing a radioactive material storage cask against airplane crashes with LS-Dyna. In: *Proc. of 13th International LS-Dyna Users Conference*, 2016, pp. 68–74.
- [6] Kuryndin A.V., Kirkin A.M., Karimov A.Z., Los V.A. O podkhodakh k raschetnomu modelirovaniyu ispytaniy TUK na udarnoe vozdeystvie pri padenii samoleta [On approaches to computational simulation of the SP tests for impact during an airplane crash]. *Voprosy atomnoy nauki i tekhniki. Seriya materialovedenie i novye materialy — Issues of atomic science and technology. Series: Materials Science and New Materials*, 2022, issue 4 (115), pp. 37–50.
- [7] Birbraer A.N., Roleder A.Y. *Ekstremalnye vozdeystviya na sooruzheniya* [Extreme impacts on structures]. St. Petersburg, Politekhicheskyy Universitet Publ., 2009, 600 p.

- [8] Veldanov V.A., Dudik D.E., Maksimov M.A., Fedorov S.V., Kozlov V.S. Vliyanie uglov ataki na pronikanie udlinennykh udarnykh [Influence of angle of attack on the penetration of elongated rod projectiles]. *Inzhenerny zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2013, iss. 2. Available at: <https://engjournal.bmstu.ru/catalog/machin/blasting/572.html>
- [9] Sugano T., Tsubota H., Kasai Y., Koshika N. Full-scale aircraft impact test for evaluation of impact force. *Nuclear Engineering and Design*, 1993, vol. 140, iss. 3, pp. 373–385.
- [10] Kazantsev A.G., Radchenko M.V., Petrov O.M., Orlov V.V., Abramov V.V., Kakhadze T.J. Opredelenie parametrov metaemogo tela pri imitatsionnykh ispytaniyakh na udar samoleta transportnykh upakovochnykh komplektov [Determination of the thrown body parameters during simulated aircraft impact tests of the shipping packages]. *Tyazheloe mashinostroenie — Heavy Machine Engineering*, 2023, no. 7–8, pp. 15–24.
- [11] Abramov V.V., Kazantsev A.G., Petrov O.M., Buchelnikov A.E., Kochura I.A., Kravchenko V.P., Sedov R.S., Tausenev V.V., Radchenko M.V., Kharin M.V. Ispytaniya maketa transportnogo upakovochnogo komplekta [Tests of the shipping package mock-up]. *Atomnaya energiya — Atomic Energy*, 2023, vol. 134, no. 3–4, pp. 164–169.
- [12] Grigoriev V.V., Isakov S.N., Petrov R.L., Yurkin S.V. Gazodinamicheskoe issledovanie pnevmaticheskogo linemeta [Gasdynamic study of a pneumatic line gun]. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki — Technical Physics*, 2006, vol. 76, no. 3, pp. 75–81.
- [13] Del G.D., Novikov N.A. *Metod delitelnykh setok* [The method of dividing grids]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1979, 143 p.

Kazantsev A.G., Dr. Sc. (Eng.), Professor, Head of the Department of Strength, JSC “NPO “TSNIITMASH”. e-mail: agkazantsev@cniitmash.com

Abramov V.V., Senior Researcher, JSC “NPO “TSNIITMASH”.
e-mail: vvabramov@cniitmash.com

Petrov O.M., Cand. Sc. (Eng.), Senior Researcher, JSC “NPO “TSNIITMASH”.
e-mail: ompetrov@cniitmash.com

Radchenko M.V., Cand. Sc. (Eng.), Leading Specialist, JSC “Atomspectrans”.
e-mail: mvr@nuclearcask.ru