

**ПРОБЛЕМЫ ЯДЕРНОЙ, РАДИАЦИОННОЙ
И ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ**

УДК 621.869.888:621.039.54

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ ТРАНСПОРТНОГО
УПАКОВОЧНОГО КОМПЛЕКТА ПЕРЕД СОУДАРЕНИЕМ С
ЖЁСТКОЙ ПРЕГРАДОЙ ПРИ АВАРИЙНЫХ ИСПЫТАНИЯХ НА
РАКЕТНОМ ТРЕКЕ**

© 2020 С.И. Герасимов^{*,**}, В.И. Ерофеев^{*}, В.А. Кикеев^{*}, О.В.Кривошеев^{**},
В.И. Костин^{*}, И.А. Одзерихо^{*,**}, Р.В. Герасимова^{**}, А.А. Глухов^{**},
В.В. Писецкий^{**}

^{*}Институт проблем машиностроения РАН, Нижний Новгород, Россия

^{**}Саровский физико-технический институт НИЯУ МИФИ, Саров, Россия

Проверка соответствия конструкции транспортного упаковочного комплекта требованиям, предъявляемым к упаковкам, предназначенным для перевозки радиоактивных материалов воздушным транспортом, предусматривает столкновение с мишенью со скоростью не менее 90м/с. Подтверждение этого базового параметра испытаний должно дублироваться несколькими методиками измерений, в том числе и с применением аналоговых средств кинорегистрации. В работе описан алгоритм определения скорости транспортного упаковочного комплекта перед соударением по информации на пленочном носителе. Рассматриваются вопросы, связанные с выбором геометрической схемы регистрации и реализацией различных вариантов заполнения кадров. Описано определение линейного перемещения транспортного упаковочного комплекта в плоскости съемки, расчет масштаба и частоты съемки. Приведен пример применения методики к определению скорости транспортного упаковочного комплекта перед соударением в одном из опытов на ракетном треке.

Ключевые слова: скорость движения, соударение, упаковка, радиоактивные материалы, отработанное ядерное топливо, воздушная перевозка, авария, оборудование ракетного трека.

Поступила в редакцию 25.10.2019

После доработки 16.02.2020

Принята к публикации 20.02.2020

Кинофотограмметрические измерения скорости движения транспортного упаковочного комплекта (ТУК) перед соударением с жёсткой преградой проводятся в соответствии с требованиями [1] в опытах на ракетном треке [2-9].

Измерения основаны на получении дискретных фотоизображений ТУК посредством покадровой скоростной кино- или видеосъемки, с последующей аналитической обработкой получаемых фотоизображений. Фоторегистрация осуществляется в соответствии с геометрической схемой на рисунке 1 и производится минимум одной кино- или видеокамерой из точки S_n (центра проектирования), которая является передней узловой точкой съёмочного объектива камеры. Установка съёмочной камеры производится так, чтобы плоскость изображения и плоскость, в которой перемещается ТУК, были параллельны, а оптическая ось S_nO камеры занимала положение, перпендикулярное к плоскости движения ТУК. Тогда с учетом линейного увеличения оптической системы съёмочного аппарата, получаемые в результате линейных измерений, величины будут полностью соответствовать. Перпендикулярность оптической оси кинокамеры достигается с помощью геодезических средств измерений, путем использования двух створных точек, которые

закрепляются на местности перпендикулярно направлению движения ТУК. Съёмочная камера устанавливается над одной из точек створа и визируется на противоположную точку створа. Допустимая неперпендикулярность – не более $\pm 1-3$ угловых градуса.

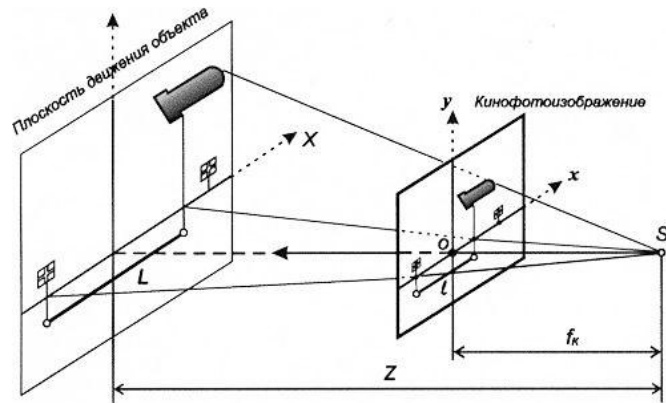


Рисунок 1 – Геометрическая схема метода кинофотограмметрических измерений [Geometric scheme of photophotogrammetric measurement method]

К параметрам движения, определяемым по данной методике, относятся:

- L – линейные перемещения ТУК в плоскости съемки;
- t_{np} – временные интервалы развития фаз движения ТУК (промежутки времени между единичными кадрами);
- $V_{об}$ – средняя линейная скорость движения ТУК.

Первые два параметра определяются на основе материалов скоростной кино или видеосъемки, а средняя скорость движения ТУК путем расчета по формуле (1):

$$V_{об} = \frac{L}{t_{np}} = \frac{l \cdot n_c}{M_c \cdot k_{np}}, \quad (1)$$

где $V_{об}$ – средняя скорость движения ТУК;

n_c – частота съемки;

k_{np} – число кадров на процесс;

l – величина перемещения изображения ТУК за число кадров k_{np} ;

M_c – масштаб съемки.

Данная формула справедлива при движении ТУК в пространстве перпендикулярно оптической оси $S_n O$ объектива съёмочной камеры и допущении о равноускоренности (равнозамедленности) движения на участке измерений. При испытаниях в качестве измеряемого параметра принимается средняя скорость движения ТУК на участке длиной 0.5-1.0 м, за 50-200 мм перед соударением с преградой.

Расчет масштаба и частоты скоростной кинофотосъемки производится на основе аналитических связей между параметрами съёмочного аппарата и параметрами движения изучаемого ТУК, с учетом погрешностей непосредственных измерений. Выбираемые параметры должны обеспечивать получение заданной измерительной информации эксперимента с допустимой относительной погрешностью результата измерений.

Определение линейных перемещений ТУК с помощью скоростной кино- или видеосъемки производится по формуле (2):

$$L = \frac{l}{M_c}, \quad (2)$$

Считая, что во время съемки изображение ТУК или его характерных точек заполняет весь кадр, масштаб съемки можно выразить в общем виде (3):

$$M_c = \frac{r_k}{D_{max}} = \frac{f_k}{z}, \quad (3)$$

где r_k – размер кадра;

D_{max} – максимальный размер (поперечный или продольный) объекта съёмки;

f_k – фокусное расстояние объектива камеры;

z – дистанция (отстояние) до объекта съемки.

В общем случае возможны два основных варианта определения масштаба съемки:

1. Движущийся ТУК во всех последовательных положениях полностью (или частично, но одинаково для ряда положений) фиксируется на пленке без искажения контуров или других характерных форм. Если размеры объекта (или его отдельных частей) до съемки известны, то точное вычисление масштаба съемки может быть произведено после измерения с помощью компаратора величины изображения известного размера.

2. Размеры и контуры снимаемого ТУК не помещаются в кадре целиком, либо не остаются постоянными в процессе съемки и не могут быть использованы для непосредственного определения масштаба съемки.

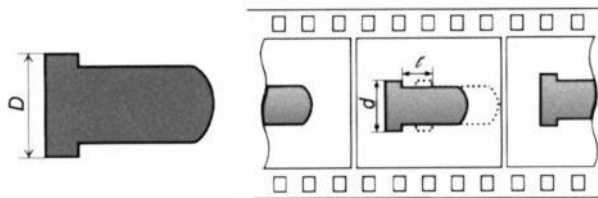


Рисунок 2 – Рабочий кадр [Work frame]

По 1 варианту определение линейных перемещений по формуле (2) сводится:

- 1) к измерению детали или ее части до съемки (размер D , рис. 2);
- 2) к измерению на кадре съёмки величины изображения ТУК или его части (размер d);
- 3) к измерению на кадре съёмки величины перемещения изображения ТУК (l).

Во втором варианте масштаб съемки не может быть определен непосредственно из обмера изображения ТУК на снимке. Тогда для определения перемещений при съемке между камерой и объектом съёмки устанавливается специальная масштабная рейка (неподвижные базисные реперы), которая располагается параллельно оси движения объекта съемки (рис. 3).

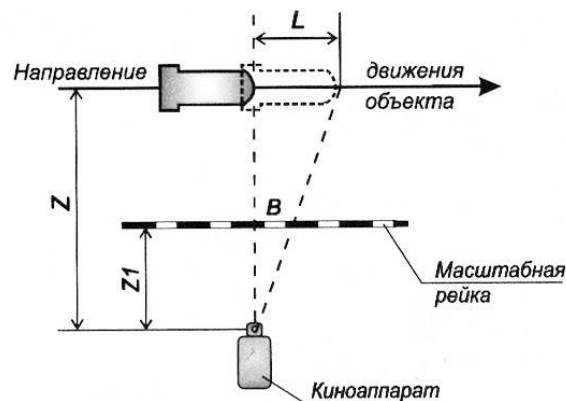


Рисунок 3 – Положение базисных реперов [Basic benchmark position]

Для вычисления перемещений используется формула (4):

$$L = \frac{l}{b_{max}} \cdot \frac{z}{z_1} \cdot B_{max} , \quad (4)$$

где B – длина рейки (или её части), мм;

l – величина перемещения изображения (по снимку), мм;

b – длина изображение рейки, мм;

z – расстояние от узловой точки объектива кинокамеры до оси объекта, м;

z_1 – расстояние до рейки, м.

Величины l и b измеряются на снимке с помощью компьютерной программы цифровой фотограмметрии; Z и Z_1 измеряются на месте съемки перед проведением эксперимента; длина рейки B (база) известна до съемки из чертежа или измеряется на месте.

Перед проведением скоростной кино- или видео съемки выбирается необходимая частота n_c съемки, обеспечивающая получение качественной фотоинформации в виде серии кадров, содержащих наиболее достоверные данные об изучаемом ТУК. Выбор частоты съемки производится с учетом характера и параметров изучаемого ТУК и возможностей применяемого съемочного аппарата.

В зависимости от скорости движения ТУК частота съемки задается исходя из допустимого смещения оптического изображения на снимке, вызванного перемещением ТУК за время экспонирования одного кадра и находящегося в пределах разрешающей способности съёмочной камеры, т.е. исходя из допустимой нерезкости $\Delta_{дон}$. Значение $\Delta_{дон} = 1/R_f$. R_f – фотографическая разрешающая способность объектива съёмочной камеры в лин/мм.

При движении объекта съемки (рис. 4) с некоторой линейной скоростью $V_{об}$ перпендикулярно к оптической оси съёмочной камеры, смещение объекта в плоскости изображения неподвижного кадра будет равно $\Delta v_{из} \cdot t_b$, где $v_{из}$ – линейная скорость оптического изображения объекта съемки; t_b – время экспонирования одного кадра (выдержка).



Рисунок 4 – Оптическая схема съемки [Optical design]

Скорость $v_{из}$ определяется по формуле:

$$v_{из} = V_{об} \cdot M_c,$$

где M_c – линейное увеличение при съемке (масштаб съёмки). С некоторым приближением M_c можно определить при помощи выражения (3). Продолжительность выдержки:

$$t_b = \frac{1}{n_c \cdot \mu} \quad \left(\text{или } t_b = \frac{\eta_{об} t}{n_c} \right),$$

где μ – коэффициент скважности для киноаппарата;

$\eta_{обит}$ – коэффициент обтюрации);

n_c – частота киносъемки.

Для вычисления Δ имеем $\Delta = \frac{V_{об} \cdot M_c}{n_c \cdot \mu} \quad \left(\text{или } \Delta = V_{об} \cdot M_c \cdot \frac{\eta_{об} t}{n_c} \right).$

Приравняв $\Delta = \Delta_{\text{дон}} = 1/R_{\text{ср}}$, для определения частоты киносъёмки n_c получим следующее выражение:

$$n_c = \frac{V_{\text{об}} \cdot M_c \cdot R_{\text{ср}}}{\mu} \quad (\text{или } n_c = V_{\text{об}} \cdot M_c \cdot R_{\text{ср}} \cdot \eta_{\text{об}t}).$$

Соответственно, для определения частоты кадров при видеоосъемке:

$$n_c = V_{\text{об}} \cdot M_c \cdot R_{\text{ср}}.$$

На каждом кинокадре регистрируется линейное перемещение ТУК, которое отражает развитие процесса движения ТУК во времени. На кинограмме (в случае аналоговой съемки) отображается ряд временных меток, служащих для определения частоты киносъёмки и расчета временных интервалов между двумя любыми кадрами. Метки времени записываются в виде полосок разной ширины, впечатанных вдоль краёв кинограммы вне зоны кадров с частотой 1, 10, 100, 1000 и 10000 Гц (рис. 5).

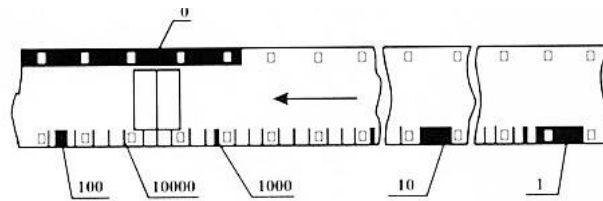


Рисунок 5 – Впечатанные метки времени [Imprinted timestamps]

Со стороны противоположной отметкам времени впечатывается сплошная полоса 0-метка (нуль-метка), соответствующая началу снимаемого процесса. Обработку последовательных положений фотоизображений изучаемого ТУК, получаемых с последовательных кадров, начинают с нумерации этих кадров. Первый кадр (k_1) соответствует началу, а последний ($k_{\text{пр}}$) – окончанию измерений на киноплёнке линейных перемещений снимаемого ТУК

При осуществлении измерений в качестве нулевой базы отсчета используется изображение в кадре неподвижного репера или перекрестия. Для определения линейного увеличения при съемке (масштаба съемки) измеряются линейные координаты x_a , x_b начала и конца изображения масштабной рейки (базисных реперов) в кадре. Тогда максимальная длина изображения масштабной рейки (расстояние между реперами) вычисляется как:

$$b = x_a - x_b.$$

При измерении линейных перемещений изображения выполняются измерения координат x_a , x_k между изображением внешнего неподвижного репера и изображением ТУК в кадре, фиксирующем определенную фазу процесса.

Величина линейных перемещений изображения определяется как:

$$\begin{aligned} l_1 &= x_{k_1} - x_{a_1}; \\ l_k &= x \cdot k_{\text{пр}} - x \cdot a_{\text{пр}}; \\ l &= l_k \cdot l_1. \end{aligned}$$

Для определения частоты киносъёмки производится подсчет интервала времени (длительности процесса). В пределах измеряемого отрезка на киноплёнке подсчитывается число меток N_i , имеющих наибольшую ширину из всех впечатанных на данном отрезке. Затем в пределах измеряемого отрезка, но вне расположения подсчитанных ранее меток наибольшей ширины, подсчитывается число меток шириной, меньшей, чем ширина ранее подсчитанных меток. Аналогично последовательно подсчитывается количество остальных меток N_i .

Длительность процесса

$$t_{\text{пр}} = (N_1 - 1) \cdot \frac{1}{t_1} + N_2 \cdot \frac{1}{t_2} + N_3 \cdot \frac{1}{t_3} + N_4 \cdot \frac{1}{t_4},$$

где $N_1 \dots N_4$ – количество меток различной ширины (по убыванию ширины);
 $t_1 \dots t_4$ – период следования меток времени.

Погрешность измерения при этом будет соответствовать частоте подсчитанных меток, имеющих меньшую ширину. Частота киносъёмки вычисляется как $n_c = \frac{k_{\text{пр}}}{t_{\text{пр}}}$, где $k_{\text{пр}}$ – число кадров на процесс.

По завершению фотограмметрической (измерительной) обработки кинограмм осуществляется вычислительная обработка измерений:

– вычисляется истинный масштаб киносъёмки с использованием формулы (3), либо по формуле:

$$M_c = \frac{b}{B} \cdot \frac{z_1}{z},$$

– вычисляется истинное линейное перемещение ТУК S по формуле (2);

– вычисляется средняя линейная скорость движения ТУК.

Погрешности кинофотограмметрических измерений скорости движения ТУК призменными камерами с непрерывным транспортированием киноплёнки зависят от выбранных в эксперименте параметров съёмки, параметров киноизмерительной аппаратуры и погрешностей непосредственных измерений по кинофотоизображениям. Систематические погрешности изучаются и устраняются введением поправок, а случайные погрешности, источником которых может являться одно из звеньев измерительной системы, должны правильно оцениваться.

Определение скорости ТУК по формуле (1) является косвенным измерением, которое представляет собой определение физического параметра при его функциональной зависимости от нескольких измеряемых параметров. Согласно теории вероятностей, среднеквадратическое относительное отклонение случайной величины $V_{\text{об}} = \left(\frac{1}{k_{\text{пр}}}\right) \cdot l \cdot n_c \cdot M_c^{-1}$, являющейся некоторой функцией произведения независимых случайных величин l, n_c, M_c , можно записать в виде:

$$\frac{\sigma V_{\text{об}}}{V_{\text{об}}} = \pm \sqrt{\left[\frac{\sigma l}{l}\right]^2 + \left[\frac{\sigma n_c}{n_c}\right]^2 + \left[\frac{\sigma M_c}{M_c}\right]^2}. \quad (5)$$

Число кадров $k_{\text{пр}}$, является коэффициентом и на погрешность измерений не влияет.

Среднеквадратическое отклонение σl получается из результатов прямых измерений по кинофотоизображению и принимается равным минимальному элементу изображения ТУК, зафиксированному отдельно.

$\sigma l = \Delta_{\text{дон}} = 1/R_{\text{ф}}$, а среднее относительное значение этого параметра

$$\frac{\sigma l}{l} = \frac{1}{R_{\text{ср}} \cdot r_k}, \quad (6)$$

где r_k – размер (ширина) кадра,

$l = r_k$ при максимальном заполнении кадра.

Путь, пройденный изображением ТУК на кинофотоизображении, может быть выражен через параметры киносъёмки в эксперименте из соотношения:

$$l = M_c \cdot V_{об} \cdot \frac{k_{пр}}{n_c},$$

а выражение аналитической связи между относительным средним квадратическим отклонением перемещения изображения ТУК, параметрами эксперимента и съемки будет иметь следующий вид:

$$\frac{\sigma l}{l} = \frac{n_c}{R_{\phi}} \cdot V_{об} \cdot k_{пр} \cdot M_c.$$

Следует учитывать, что разрешающая способность кинокамеры R_{ϕ} – статистическая величина, полученная экспериментально, поэтому для ее применения надо использовать тест-объект, по контрасту близкий к объекту анализа киносъемкой.

Второе слагаемое (5) – относительная погрешность определения частоты съемки, которая вычисляется по временным меткам на кинофотоизображении и представляет величину, аналитически не зависящую от других параметров съемки, $n_c = f_u \cdot k_m$, где f_u – частота следования временных меток, k_m – число кадров на одну метку. По этой формуле определяется частота съемки при записи меток от промышленной сети переменного тока.

Если же запись меток осуществляется от импульсного генератора, то частоту съемки определяют из выражения:

$$n_c = f_n \cdot \frac{k_{пр}}{m_{пр}},$$

где $m_{пр}$ – число меток на процесс.

Учитывая, что k_m , $k_{пр}$, $m_{пр}$ не вносят погрешности, имеем:

$$\frac{\sigma n_c}{n_c} = \frac{\sigma f_n}{f_n}, \quad (7)$$

т.е. случайная относительная погрешность определения частоты съемки зависит от нестабильности частоты генератора временных меток.

Относительная случайная погрешность измерения третьей величины – масштаба съемки – зависит от способа определения увеличения оптической системы кинокамеры. А так как значение M_c находится по шкалам или реперам, устанавливаемым в плоскости движения объекта съемки, то принимая $M_c = b/B$, где B , b – размеры репера и его изображения соответственно, получим максимальную относительную погрешность масштаба съемки:

$$\frac{\sigma M_c}{M_c} = \pm \sqrt{\left[\frac{\sigma b}{b}\right]^2 + \left[\frac{\sigma B}{B}\right]^2}. \quad (8)$$

Заменяв правую часть (5) соотношениями (6), (7) и (8), получим:

$$\frac{\sigma V_{об}}{V_{об}} = \pm \sqrt{\left[\frac{n_c}{R_{cp} \cdot V_{об} \cdot k_{пр} \cdot M_c}\right]^2 + \left[\frac{\sigma f_n}{f_n}\right]^2 + \left[\frac{\sigma b}{b}\right]^2 + \left[\frac{\sigma B}{B}\right]^2}. \quad (9)$$

С учетом выражения $n_c = \frac{V_{об} \cdot M_c \cdot R_{cp}}{\mu}$ имеем:

$$\frac{\sigma V_{об}}{V_{об}} = \pm \sqrt{\left[\frac{1}{k_{пр} \cdot \mu}\right]^2 + \left[\frac{\sigma f_n}{f_n}\right]^2 + \left[\frac{\sigma b}{b}\right]^2 + \left[\frac{\sigma B}{B}\right]^2}, \quad (10)$$

где μ – коэффициент скважности кинокамеры. Получение результата с малой погрешностью зависит от первого слагаемого формул (9), (10). Определение масштаба съемки практически осуществляется с погрешностью того же порядка, что и перемещение изображения ТУК. Как видно, случайная погрешность результата тем ниже, чем крупнее масштаб изображения, выше оптическое разрешение, выше скорость ТУК и больше коэффициент скважности.

Руководствуясь полученным алгоритмом, оценим погрешность определения скорости движения ТУК при измерениях стандартной аналоговой камерой с максимальным заполнением кадра и записью временных меток от кварцевого генератора частотой 1000 Гц, и нестабильностью частоты 10^{-3} . Разрешающая способность камеры составляет 15 мм^{-1} , ширина кадра 10 мм. Подставляя эти значения в (6), получим значение относительной погрешности определения пути $(\sigma l)/l = \pm 0,007$.

Вторая составляющая погрешности определения скорости за счет нестабильности кварцевого генератора 10^{-4} :

$$\frac{\sigma n_c}{n_c} = \pm 0,0001.$$

Составляющие погрешности определения масштаба съемки находим следующим образом. Считаем, что изображение масштабной рейки/базы между специальными реперами заполняет кадр полностью, тогда

$$\frac{\sigma b_{max}}{b_{max}} = \pm 0,007.$$

Что касается получения натуральных размеров базы, то они определяются с малой погрешностью. Киносъемка ведется с расстояния 5 м объективом, имеющим фокусное расстояние 50 мм, при этом наибольший размер изображаемой части плоскости предмета составит 1000 мм, а погрешность $\sigma B_{max} = \pm 1,0 \text{ мм}$, тогда:

$$\frac{\sigma B_{max}}{B_{max}} = \pm 0,007.$$

Подставляя численные значения погрешностей в (5), получим результирующую погрешность:

$$\frac{\sigma V_{об}}{V_{об}} = \pm 0,01$$

для доверительной вероятности 0,683 и нормального закона распределения. При переходе к оценке с доверительной вероятностью 0,95 погрешность определения скорости составит:

$$\frac{\sigma V_{об}}{V_{об}} = \pm 1,96 \cdot \frac{\sigma V_{об}}{V_{об}} = \pm 1,96 \cdot 0,01 \cdot 100\% = \pm 1,96\%,$$

где 1,96 – нормированная квантиль нормального распределения для доверительной вероятности 0,95. Точность методики подтверждалась в опыте, в котором испытываемый ТУК (рис. 6а) должен был подвергнут столкновению с мишенью (рис. 6б) со скоростью не менее 90 м/с.

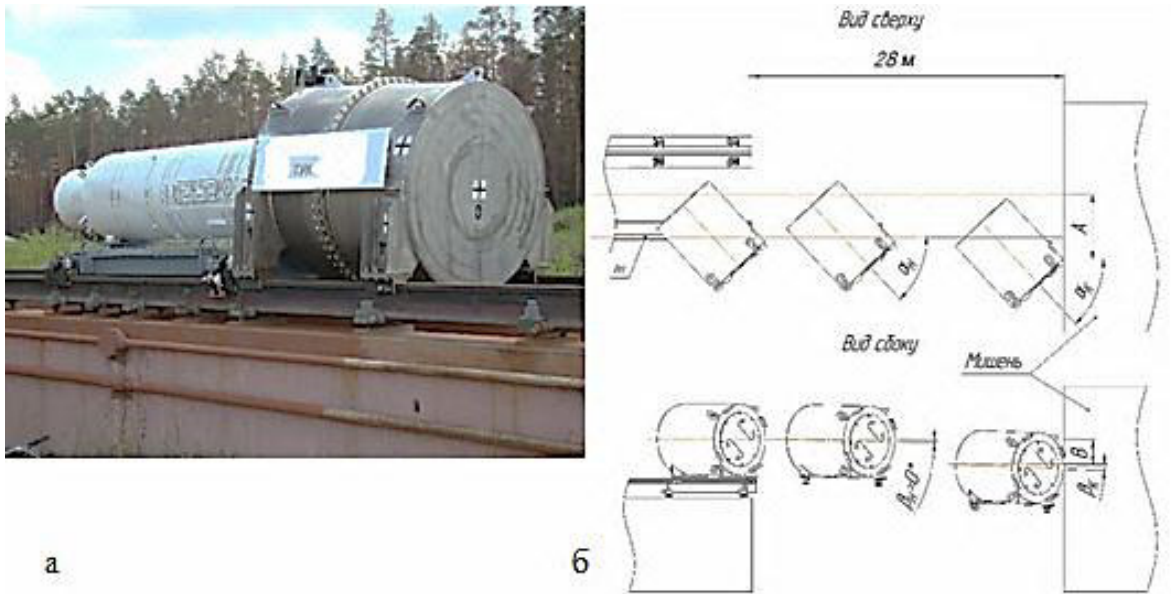


Рисунок 6 – Объект испытания (а) и схема проведения испытания (б) [Test object (a) and test design (b)]

Зависимости скорости движения и продольной перегрузки от времени приведены на рисунке 7.

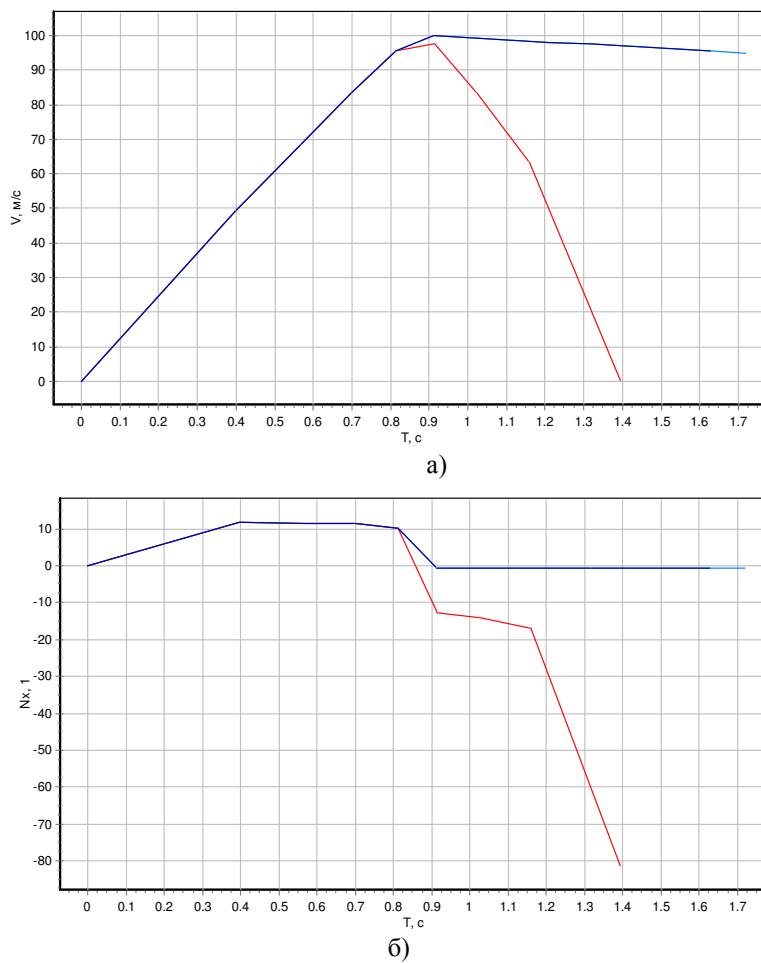


Рисунок 7 – Параметры движения ракетного поезда с ТУК, скорость движения (а), продольная перегрузка (б) [Parameters of rocket train movement from a transport packaging kit, speed (a), longitudinal overload (b)]

На рисунке 8 представлены кадры отделения ТУК от тормозящейся ракетного поезда (а) и кадры подлета ТУК к преграде, полученные камерой сверху.



а)



б)

Рисунок 8 – Регистрация движения ТУК в опыте: а) кадры разгона и отделения ТУК от ракетного поезда; б) подлет ТУК к преграде [The registration of the transport packaging movement in the experiment: a) shots of dispersal and separation of transport packaging from the rocket train; b) the transport packaging approach]

Видео- и фотограмметрические измерения проводились по представленной методике с использованием широкоформатных фотограмметрических камер АФА и скоростной видеокамеры, расположенных сверху на платформе при вертикальном направлении оптических осей, перпендикулярно к направлению движения испытываемого макета.

Цифровая фотограмметрическая обработка снимков АФА и видеок кадров включала метрическое дешифрирование. Угол подхода объекта испытаний к преграде определялся по фотоснимку АФА, а скорость подхода – по кадрам скоростной видеокамеры.

Значения горизонтального угла φ и средней скорости подхода упаковки к мишени за $\sim 2,0$ м перед мишенью, полученные по результатам обработки в опыте, и значение средней скорости за $\sim 0,5$ м до касания с мишенью составили $\varphi = -55,1 \pm 0,4$ (град); $v = 92,6$ м/с $\pm 2\%$.

Полученные точности удовлетворяют требованиям МАГАТЭ при проведении испытаний макета упаковки ТУК в условиях, имитирующих авиационную аварию [9-12].

Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ № МК-2078.2019.8.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Нормы МАГАТЭ по безопасности для защиты людей и охраны окружающей среды. Правила безопасной перевозки радиоактивных материалов. Конкретные требования безопасности. № SSR-6. IAEA. 2012.
2. Герасимов, С. И. Постановка испытаний топливных упаковочных комплектов на ракетном треке / С. И. Герасимов, В. И. Ерофеев, Р. В. Герасимова, К. И. Ляхов, А. В. Мельник, И. А. Одзерихо, Б. А. Яненко // Глобальная ядерная безопасность. – 2017. – № 3(24). – С. 68-76.
3. Gerasimov S. I., Erofeev V. I., Kamchatnyi V. G., Odzerikho I. A. The Sliding Contact Condition in Stability Analysis of Stage Motion for a Rocket Sled Track Facility. Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 2018. Vol. 47. N 3. P. 221-226.
4. Герасимов, С. И. Устойчивость движения высокоскоростных объектов по направляющим ракетного трека / С. И. Герасимов, С. В. Бутова, В. И. Ерофеев, В. Г. Камчатный // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2015. – № 1. – С. 3-8.
5. Rigali, D.J., Feltz L.V. High-Speed Monorail Rocket Sleds for Aerodynamic Testing at High Reynolds Numbers. «Journal of Spacecraft and Rockets». 1968. Vol. 5. № 11. P. 1341-1346.
6. James L. Lamb, Critical Velocities for Rocket Sled Excitation of Rail Resonance. JOHNS HOPKINS APL TECHNIKAL DIGEST. Vol. 21. N 3 (2000).
7. Metrikine A.V., Verichev S.N. Instability of Vibrations of a Moving Two Mass Oscillator on a Flexibly Supported Timoshenko Beam. Archive of Applied Mechanics. 2001. Vol. 71. No 9. P. 613-624.
8. Question on Rail transport of radioactive materials – Hinkley Point. 2017. URL: www.onr.org.uk.
9. Spent Fuel Transportation Package Response to the Baltimore Tunnel Fire Scenario (NUREG/CR-6886). November 2006. U.S. Nuclear Regulatory Commission. URL: <http://www.sandia.gov/media/firetest.htm>
10. Spent Nuclear Fuel Assay Data for Isotopic Validation State-of-the-art Report Nuclear Science Committee Working Party on Nuclear Criticality Safety (WPNCSS) Expert Group on Assay Data of Spent Nuclear Fuel (EGADSNF) OECD 2011. 97 p.
11. Managing Spent Fuel from Nuclear Power Reactors Experience and Lessons from Around the World. Edited by Harold Feiveson, Zia Mian, M.V. Ramana and Frank von Hippel. 2011. International Panel on Fissile Materials. URL: www.fissilematerials.org.
12. Transportation and Storage Subcommittee; Report to the Full Commission; Updated Report, Blue Ribbon Commission on America's Nuclear Future, January 2012. URL: http://www.brc.gov/sites/default/files/documents/final_updated_ts_report_012612.pdfhttp://www.brc.gov/sites/default/files/documents/draft_ts_report_6-1-11.pdf.

REFERENCES

- [1] Normy` MAGATE` po bezopasnosti dlya zashhity` lyudej i oxrany` okruzhayushhej srede`. Pravila bezopasnoj perevozki radioaktivny`x materialov. Konkretny`e trebovaniya bezopasnosti [IAEA Safety Standards for the Protection of People and Environment. Rules for the Safe Transport of Radioactive Materials. Specific Safety Requirements]. No. SSR-6. IAEA. 2012 (in Russian).
- [2] Gerasimov S.I., Erofeev V.I., Lyakhov K.I., Melnik A.V., Odzerikho I.A., Yanenko B.A. Postanovka ispy`tanij toplivny`x upakovochny`x komplektov na raketnom treke [Statement of Tests on the Missile Track of Fuel Packaging Kits]. Global`naya yadernaya bezopasnost` [Global Nuclear Safety]. No 3(24). 2017. P. 68-76 (in Russian).
- [3] Gerasimov S.I., Erofeev V.I., Kamchatnyi V.G., Odzerikho I.A. The Sliding Contact Condition in Stability Analysis of Stage Motion for a Rocket Sled Track Facility. Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 2018. Vol. 47. No. 3. P. 221-226.
- [4] Gerasimov S.I., Butova S.V., Erofeev V.I., Kamchatka V.G. Ustojchivost` dvizheniya vy`sokoskorostny`x ob`ektov po napravlyayushhim raketnogo treka [Stability of Movement of High-Speed Objects along the Guides of the Missile track]. Problemy` mashinostroeniya i nadezhnosti mashin [Problems of Mechanical Engineering and Reliability of Machines]. No.1. 2015. P. 3-8 (in Russian).
- [5] Rigali D.J. and Feltz L.V. High-Speed Monorail Rocket Sleds for Aerodynamic Testing at High Reynolds Numbers. «Journal of Spacecraft and Rockets». 1968. Vol. 5. No. 11. P. 1341-1346.
- [6] James L. Lamb, Critical Velocities for Rocket Sled Excitation of Rail Resonance. JOHNS HOPKINS APL TECHNIKAL DIGEST. Vol. 21. No. 3 (2000).
- [7] Metrikine A.V., Verichev S.N. Instability of Vibrations of Moving Two Mass Oscillator on a Flexibly Supported Timoshenko Beam. Archive of Applied Mechanics. 2001. Vol. 71. No 9. P. 613-624.

- [8] Question on Rail transport of radioactive materials – Hinkley Point. 2017. URL: www.onr.org.uk.
- [9] Spent Fuel Transportation Package Response to the Baltimore Tunnel Fire Scenario (NUREG/CR-6886). November 2006. U.S. Nuclear Regulatory Commission. URL: <http://www.sandia.gov/media/firetest.htm>.
- [10] Spent Nuclear Fuel Assay Data for Isotopic Validation State-of-the-art Report Nuclear Science Committee Working Party on Nuclear Criticality Safety (WPNCSS) Expert Group on Assay Data of Spent Nuclear Fuel (EGADSNF) OECD 2011. 97 p.
- [11] Managing Spent Fuel from Nuclear Power Reactors Experience and Lessons from Around the World. Edited by Harold Feiveson, Zia Mian, M.V. Ramana and Frank von Hippel. 2011 International Panel on Fissile Materials. URL: www.fissilematerials.org.
- [12] Transportation and Storage Subcommittee; Report to the Full Commission; Updated Report, Blue Ribbon Commission on America's Nuclear Future, January 2012. URL: http://www.brc.gov/sites/default/files/documents/final_updated_ts_report_012612.pdf
http://www.brc.gov/sites/default/files/documents/draft_ts_report_6-1-11.pdf.

Determination of Transport Packaging Kit Speed before Impact with a Rigid Barrier during Emergency Impact Tests on the Missile Track

S.I. Gerasimov^{*,**1}, V.I. Erofeev^{*2}, V.A. Kikeev^{*3}, O.V. Krivosheev^{**4}, V.I. Kostin^{*5}, I.A. Odzeriho^{*,**6}, R.V. Gerasimova^{**7}, A.A. Glukhov^{**8}, V.V. Pisetskiy^{**9}

**Mechanical Engineering Research Institute of Russian Academy of Sciences, Nizhny Novgorod, 85 Belinskogo str., Russia 603024*

***Sarov Physics and Technical Institute of National Research Nuclear University «MEPHI», Nizhny Novgorod region, Sarov, 6 Duchova str., Russia 607186*

¹ORCID iD: 0000-0002-6850-0816

WOS Researcher ID: L-2727-2016

e-mail: s.i.gerasimov@mail.ru

²ORCID iD: 0000-0002-6637-5564

e-mail: erf04@mts-nn.ru

³ORCID iD: 0000-0002-2040-2045

e-mail: vkikeev@mail.ru

⁴ORCID iD: 0000-0003-4597-4215

e-mail: staff@vniief.ru

⁵ORCID iD: 0000-0002-2711-3975

e-mail: costin.vasil@yandex.ru

⁶ORCID iD: 0000-0002-2672-7318

e-mail: odzeriho.irina@yandex.ru

⁷ORCID iD: 0000-0002-2711-3975

e-mail: grv@sarfti.ru

⁸ORCID iD: 0000-0003-4470-6518

e-mail: glukh0w.a@yandex.ru

⁹ORCID iD: 0000-0003-2878-6191

e-mail: pvv@sarfti.ru

Abstract – Verification of compliance of the transport packaging kit design with the requirements for packages intended for the transport of radioactive materials by air, provides for a collision with a target at a speed of not less than 90 M/s. Confirmation of this basic parameter of the tests should be duplicated by several measurement methods including the use of analog means of film registration. The paper describes an algorithm for determining the speed of the transport packaging kit before impact on the information on the film carrier. The questions connected with the choice of the geometrical scheme of registration and realization of various variants of frame filling are considered. The determination of the linear movement of the transport packaging kit in the shooting plane, the calculation of the scale and frequency of shooting is described. An example of the application of the technique to determine the speed of the transport packaging kit before impact in one of the experiments on the missile track is given.

Keywords: speed, impact, packaging, radioactive materials, spent nuclear fuel, air transportation, accident, missile track equipment.