

# МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ МОМЕНТА ВРЕМЕНИ ВСТРЕЧИ ИЗДЕЛИЯ С ПРЕГРАДОЙ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ВОЗДУШНЫХ ВОЛН

С. В. Батарев, А. В. Гришин, А. А. Застылов, А. В. Пещенко, А. Н. Хорошко

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

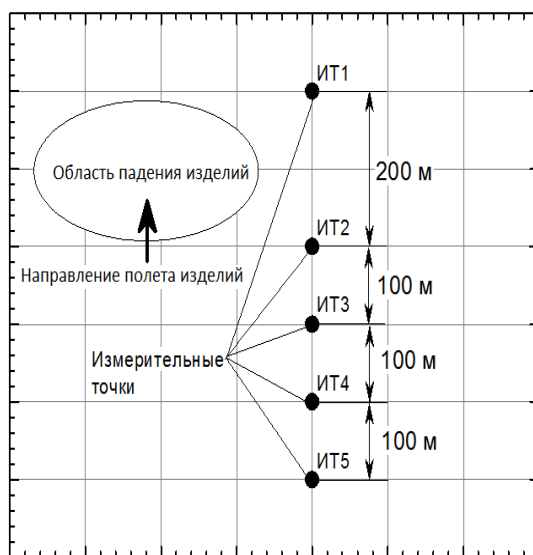
Испытания изделий, являющиеся важной и неотъемлемой частью процесса их разработки, представляют собой сложный и дорогостоящий эксперимент. Поэтому к методам и средствам измерений, применяемым в испытаниях, предъявляются требования надежного получения экспериментальных данных. На практике это обеспечивается выполнением измерений по нескольким методикам, основанным на различных физических принципах. В испытаниях некоторых видов изделий применение акустических методов и средств измерений, позволяет увеличить объем и надежность получения экспериментальных данных.

Применение акустических методов основано на измерении параметров слабых ударных и акустических волн, создаваемых в испытаниях изделием или его функциональными элементами и распространяющихся в воздушной среде во всех направлениях. Эта особенность распространения волн в среде позволяет не прицеливаться на объект, что наряду с отсутствием требований оптической прозрачности среды делает целесообразным применение акустических измерений в испытаниях некоторых видов изделий. Источником информации для получения экспериментальных данных являются сигналы как импульсного характера, порождаемые воздушными ударными волнами, так и сигналы, порождаемые широкополосными акустическими шумами длительного действия.

Для применения в испытаниях разработаны и используются акустические методики, позволяющие определять важные экспериментальные данные о пространственно-временном положении изделия на траектории. С появлением новых видов испытаний эти методики адаптируются под их задачи или же разрабатываются новые.

В частности, акустические измерения выполнялись в испытаниях, особенностью которых являлся подход группы изделий к поверхности преграды (в данном случае под преградой понимается поверхность земли) под острым углом на сверхзвуковой скорости и с разновременностью, составляющей десятки миллисекунд. Измерения параметров воздушных волн выполнялись датчиками давления в измерительных точках (ИТ). Схема размещения ИТ на мишенной площадке приведена на рис. 1а. Фотография ИТ представлена на рис. 1б. Регистрация сигналов с датчиков давления осуществлялась во времен-

ной шкале, синхронизированной с системой единого времени эксперимента.



а



б

Рис. 1. Постановка измерений в летных испытаниях: а – схема размещения ИТ на мишенной площадке, б – фотография ИТ

Результаты измерений, полученные в одной из ИТ при подходе и встрече изделий с преградой, представлены на рис. 2. Из рис. 2 видно, что датчиком зарегистрированы две группы волн. Количество волн в каждой группе равно количеству изделий

в эксперименте. В первой группе зарегистрированы баллистические ударные волны (БУВ) [2], во второй группе – акустические волны (АВ).

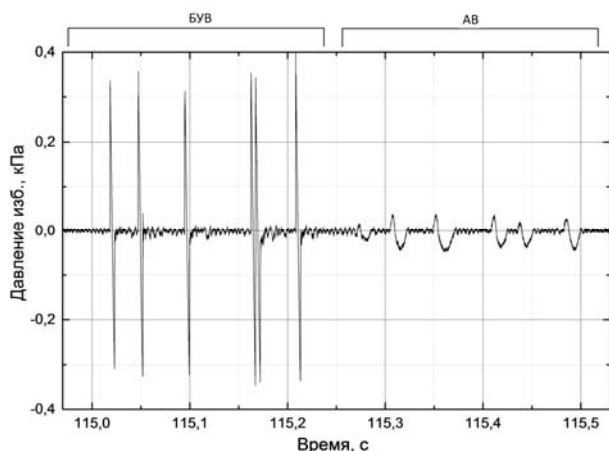


Рис. 2. Результаты акустических измерений, полученные в одной из ИТ

На рис. 3 показан профиль волны давления из первой группы. Вследствие превышения местной скорости звука изделие создает вокруг себя систему воздушных волн, огибающая которых в пространстве образует устойчивую коническую поверхность, называемую конусом возмущения. Угол  $\alpha$  между траекторией полета и образующей конуса связан соотношением  $\sin(\alpha) = 1/M$ , где  $M$  – число Маха [1]. Воздушные волны, образующие конусвозмущения, называются баллистическими ударными волнами [2], имеют характерный N-образный профиль и без значительных искажений формы распространяются в пространстве на большие расстояния.

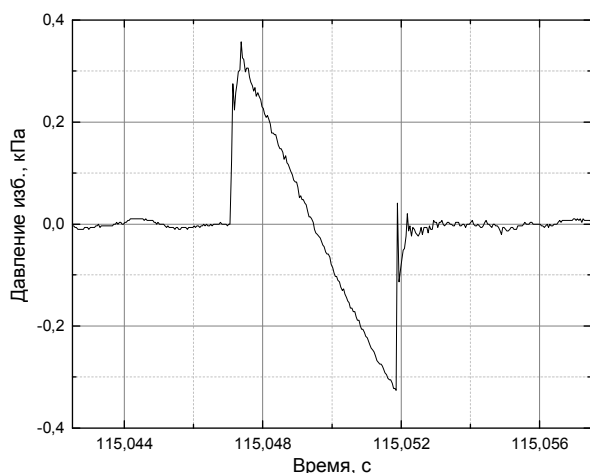


Рис. 3. Профиль избыточного давления волны из первой группы

На рис. 4 представлен профиль волны давления из второй группы. Это АВ. В отличие от БУВ, АВ несут признаки неподвижного точечного источника

звуча. При точечном возбуждении АВ распространяются сферично, с одинаковой интенсивностью во всех направлениях. С расстоянием они интенсивно затухают и уже на расстоянии  $\sim 400$  м от точки падения изделия их амплитуда не превышает 20 Па.

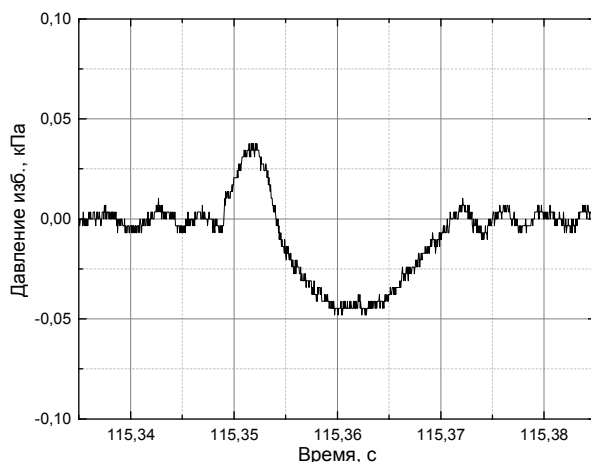


Рис. 4. Профиль избыточного давления волны из второй группы

Регистрируемое в нескольких ИТ акустическое поле в окрестности мест падения изделий подтверждает факт принципиального различия распространения БУВ и АВ (рис. 5). Точка падения тела делит измерительную площадку на «недолетную» и «перелетную» зоны. Схематично это представлено на рис. 5.

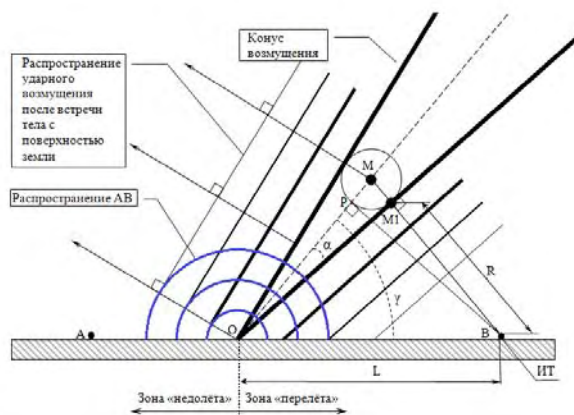


Рис. 5. Схема распространения воздушных волн при подходе и встрече сверхзвукового изделия с преградой

После встречи изделия с преградой БУВ распространяется в пространстве за первоначальные пределы конуса возмущения по нормали к его поверхности со скоростью звука. В следствие наклона оси конуса к поверхности преграды БУВ регистрируется датчиками только в «перелетной» зоне (точка В на рис. 5), в «недолетную» зону (точка А на рис. 5) она в «чистом» виде не доходит, распространяясь вдоль поверхности в виде сферической дифрагированной

волны. АВ в отличие от БУВ распространяются в воздушной среде сферично, поэтому регистрируются датчиками, как в «перелетной», так и в «недолетной» зонах.

По результатам измерений параметров АВ и БУВ можно выполнить расчет времени встречи изделия с преградой.

Момент встречи изделия с преградой  $T_{вс.АВ}$  по результатам регистрации АВ от встречи изделия с преградой может быть определен по формуле

$$T_{вс.АВ} = T_{рег.АВ} - \frac{L}{V_{зв}}, \quad (1)$$

где  $T_{рег.АВ}$  – время регистрации АВ в ИТ,  $L$  – расстояние от точки встречи изделия с преградой до датчика, вычисляется по координатам датчика и воронки,  $V_{зв}$  – скорость звука при соответствующих метеоусловиях.

Момент времени встречи изделия с преградой  $T_{вс.БУВ}$  по результатам регистрации БУВ может быть определен по формуле [3]

$$\Delta T_{вс.БУВ} = \Delta T_{рег.БУВ} - \frac{R}{V_{зв}}, \quad (2)$$

где  $T_{рег.БУВ}$  – время регистрации БУВ в измерительной точке,  $R$  – расстояние от поверхности конуса возмущения (точка М1) до ИТ (точка В) в момент встречи изделия с преградой, вычисляется с использованием данных о траектории движения изделия, описываемой на финишном участке параметрическим уравнением прямой, включающим значения углов между траекторией и осями выбранной локальной прямоугольной системы координат и значения скорости ОИ.

Скорость и направление ветра в расчетах по формулам (1) и (2) учитываются в величине скорости звука следующим образом

$$V_{зв} = V_{зв} + V'_в, \quad (3)$$

где  $V'_в$  – величина проекции вектора скорости ветра на линию распространения воздушной волны,  $V_{зв.изм}$  – скорость звука, для соответствующей температуры воздуха  $T_в$ .

Каждый из способов имеет свои преимущества. Преимущества способа определения момента встречи изделия с преградой по результатам регистрации БУВ определяются свойствами БУВ и условиями ее распространения (сверху-вниз):

- относительно большая амплитуда и малая длина волны на одинаковом удалении (по сравнению с АВ);

- характерная, легко идентифицируемая форма профиля давления;

- способность распространяться на большие расстояния без значительного изменения формы профиля давления.

Способ определения момента времени встречи изделия с преградой по результатам регистрации возбуждаемой этим процессом АВ имеет следующие достоинства:

- инвариантность, обеспечиваемая распространением волны во все стороны от точки падения изделия;

- меньшее количество данных, необходимых для выполнения расчетов (нужны лишь координаты датчика и воронки), что обеспечивает меньшую погрешность.

Описанные способы определения момента времени встречи изделия с преградой основаны на измерении воздушных волн, регистрация которых может быть осуществлена одной измерительной системой. Поэтому в основу разрабатываемой методики положены оба способа, что обеспечит надежность получения результата.

В разрабатываемой методике определены требования к размещению датчиков на мишенной площадке и их координированию, используемые средства измерений, включая датчики, согласующие устройства и регистраторы, требования к синхронизации результатов измерений с системой единого времени эксперимента, способы расчета момента времени встречи изделия с преградой и определения погрешностей обоих методов.

При размещении датчиков на мишенной площадке выполняется их геодезическая привязка к локальной системе пространственных прямоугольных координат мишенной площадки (рис. 6). В этой же системе определяются координаты фактической точки встречи изделия с преградой.



Рис. 6. Локальная система прямоугольных пространственных координат

Центром локальной системы прямоугольных пространственных координат является расчетная точка встречи изделия с преградой. Первая горизон-

тальная ось X системы координат находится в плоскости полета изделий, а ее положительное направление совпадает с направлением подхода изделия к мишенной площадке. Ось Y системы направлена вертикально вверх. Ось Z дополняет систему координат до правой. С помощью электронного тахеометра, например TRIMBLE M5<sup>™</sup>, в этой локальной системе координат мишенной площадки определяются координаты каждого датчика давления. С использованием этого оборудования в полигонных условиях обеспечивается погрешность геодезической привязки не более  $\pm 0,1$  м по каждой из координат, что существенно меньше погрешности определения координат точки встречи изделия с преградой.

Система акустических измерений включает в себя как минимум одну измерительную точку и систему управления и синхронизации (СУиС). В ИТ размещается датчик давления, который устанавливается на уровне подстилающей поверхности. С учетом возможного отклонения фактической точки попадания изделия измерительная точка может оказаться как в «перелетной», так и в «недолетной» зоне. Если ИТ окажется в «перелетной» зоне, то датчиком давления будут зарегистрированы ударные волны, вызванные полетом изделия на сверхзвуковой скорости и акустические волны, вызванных взаимодействием изделия с преградой. Если ИТ окажется в «недолетной» зоне, то датчиком давления будут зарегистрированы акустические волны, вызванные взаимодействием изделия с преградой.

В качестве первичного измерительного преобразователя используется пьезорезистивный датчик избыточного давления. Сигналы с датчика через преусилители передаются по измерительным линиям на регистраторы, размещаемые в непосредственной близости от датчиков. В качестве регистраторов применяются системы МІС-300М, МІС-355М производства отечественной фирмы НПП «МЕРА» (реализующие функции самописца с возможностью регистрации длительных минутных интервалов времени). При отсутствии электрической сети используются регистраторы в полевом исполнении, оснащенные энергонезависимой памятью.

Измерительные системы обеспечивают регистрацию сигналов в течении необходимой длительности, обусловленной условиями испытаний, с частотой дискретизации сигналов датчиков не менее 12,5 кГц. Требования по частоте опроса датчиков определены частотным диапазоном регистрируемых сигналов и условием не превышения расстояния, преодолеваемого акустической волной за период дискретизации (составляющем для 12,5 кГц менее 0,03 м) погрешности геодезической привязки датчика к локальной системе координат ( $\pm 0,1$  м). Запуск регистраторов должен быть синхронизирован с системой единого времени эксперимента.

СУиС предназначена для приема управляющих команд и сигналов системы единого времени, поступающих от синхронизирующей аппаратуры. На мишенной площадке СУиС размещается в непосред-

ственной близости от внешней аппаратуры синхронизации и управления, либо от приемной аппаратуры сигналов системы единого времени.

В перспективе система акустических измерений будет дополнена регистраторами в полевом исполнении, оснащенными модулем ГЛОНАСС/GPS для привязки измерений к системе единого времени эксперимента по сигналам спутников, и объединенными в единую сеть, обеспечивающую радиоуправление режимами работы и синхронизацию измерений.

При выполнении расчетов используется информация о параметрах атмосферы. Поэтому в процессе проведения испытаний в окрестности испытательной площадки должны выполняться измерения следующих метеоусловий:

- температура воздуха с абсолютной погрешностью  $\pm 0,5$  °С;
- скорость ветра –  $V_B$ , [м/с] с относительной погрешностью  $\delta = \pm 10$  %;
- направление ветра с абсолютной погрешностью  $\pm 15^\circ$  по азимуту.

В зависимости от характеристик испытываемой системы вооружений ИТ могут быть размещены на значительных расстояниях друг от друга с целью охвата наибольшей площади. Один комплект из четырех ИТ позволяет зарегистрировать воздушные волны на площади до 2 км<sup>2</sup>.

Опишем погрешности определения момента времени встречи изделия с преградой по результатам измерений АВ ( $\Delta T_{вс. АВ}$ ) и БУВ ( $\Delta T_{вс. БУВ}$ ).

Основными составляющими погрешности  $\Delta T_{вс. АВ}$  определения момента времени встречи изделия с преградой по результатам измерений АВ являются погрешности величин, составляющих формулу (1):

$\Delta T_{рег. АВ}$  – погрешность времени регистрации момента достижения АВ датчиком, определяется частотой дискретизации сигнала  $F_d$ , нестабильностью задающего генератора измерительной системы  $n_T$ , длительностью регистрации  $T_{рег. АВ}$  ;

$\Delta L$  – погрешность определения расстояния от воронки до датчика, определяется погрешностью определения координат датчика и воронки;

$\Delta V_{зв}$  – погрешность определения скорости звука, определяется погрешностями измерения температуры воздуха, скорости и направления ветра.

Результирующую погрешность расчета времени встречи изделия с преградой можно рассчитать согласно [4] по следующей формуле

$$\Delta T_{вс. АВ} = \pm \sqrt{(\Delta T_{рег. АВ})^2 + (\Delta T_{распр. АВ})^2} = \sqrt{\left(\frac{2}{F_d} + n_T \cdot T_{рег}\right)^2 + \left(\frac{\Delta L}{V_{зв}}\right)^2 + \left(\frac{L \cdot \Delta V_{зв}}{V_{зв}^2}\right)^2} \quad (4)$$

Рассчитаем величину погрешности с использованием следующих исходных данных:

- частота дискретизации сигнала с датчика  $F_d = 25000$  Гц;
- относительная нестабильность генератора АЦП  $n_r = 10^{-4}$ ;
- время регистрации АВ  $T_{\text{рег.}}^* = 1$  с;
- температура воздуха в окрестности измерительной площадки  $T_B = 13$  °С;
- расстояние от воронки до датчика 330 м;
- погрешность измерения расстояния от воронки до датчика  $\Delta L = 1$  м.

Скорость и направление ветра в расчетах не учитывались.

Значение погрешности  $\Delta T_{\text{рег. АВ}}$  времени регистрации АВ составляет  $\Delta T_{\text{рег. АВ}} = \pm 0,00018$  с.

Значение погрешности  $\Delta T_{\text{распр. АВ}}$  времени распространения АВ от точки встречи изделия с преградой до датчика составляет  $\Delta T_{\text{распр. АВ}} = \pm 0,0045$  с. Основной вклад в эту величину вносит погрешность  $\Delta L$  определения координат воронки от встречи изделия.

Величина  $\Delta T_{\text{распр. АВ}}$  вносит определяющий вклад в результирующую погрешность которая составит  $\Delta T_{\text{вс. БУВ}} = \pm 0,0045$  с.

Погрешность определения момента времени встречи изделия с преградой по результатам измерений БУВ имеет инструментальную и методическую составляющие.

Инструментальная составляющая погрешности определения момента времени встречи изделия с преградой по результатам измерений БУВ зависит от погрешности величин, составляющих формулу (2):

$\Delta T_{\text{рег. БУВ}}$  – погрешность времени регистрации фронта БУВ датчиком давления в ИТ (точка В на рис. 5), определяется теми же составляющими, что и  $\Delta T_{\text{рег. АВ}}$ ;

$\Delta R$  – погрешность определения расстояния от поверхности конуса возмущения (точка М1) до ИТ в момент встречи изделия с преградой, определяется погрешностью определения углов между траекторией и осями локальной прямоугольной системы координат и значения скорости ОИ и погрешностью определения координат датчика;

$\Delta V_{\text{зв}}$  – погрешность определения скорости звука, определяется погрешностями измерения температуры воздуха, скорости и направления ветра.

\* Синхронизация измерений высокостабильными секундными метками СЕВ позволяет исключить влияние нестабильности задающих генераторов системы акустических измерений – нестабильность генератора учитывается лишь на интервале между соседними метками (1 с).

Согласно [4] абсолютную инструментальную погрешность измерения момента времени встречи изделия с преградой будем рассчитывать как средне-квадратичную сумму ее составляющих

$$\Delta T_{\text{вс. БУВ}} = \pm \sqrt{(\Delta T_{\text{рег. БУВ}})^2 + (\Delta T_{\text{распр. БУВ}})^2}. \quad (5)$$

Погрешность определения времени регистрации фронта БУВ в ИТ, определяется аналогично, как и для регистрации АВ по формуле

$$\Delta T_{\text{рег. БУВ}} = \frac{2}{F_d} + n_r \cdot T_{\text{рег.}}. \quad (6)$$

Погрешность времени распространения БУВ определяется по формуле

$$\begin{aligned} \Delta T_{\text{распр. БУВ}} &= \sqrt{\left(\frac{\partial T_{\text{распр.}}}{\partial R} \cdot \Delta R\right)^2 + \left(\frac{\partial T_{\text{распр.}}}{\partial V_{\text{зв}}} \cdot \Delta V_{\text{зв}}\right)^2} = \\ &= \sqrt{\left(\frac{1}{V_{\text{зв}}} \cdot \Delta R\right)^2 + \left(\frac{R}{V_{\text{зв}}^2} \cdot \Delta V_{\text{зв}}\right)^2}. \quad (7) \end{aligned}$$

Расчет погрешности выполнялся с использованием тех же исходных данных, что и расчет по формуле (4). В результате расчетов было получено значение основной погрешности времени встречи изделия с преградой, равное  $\Delta T_{\text{вс. БУВ}} = \pm 0,0052$  с.

Методическая составляющая погрешности  $\Delta T_{\text{вс. м.}}$  обусловлена нелинейностью головной части конуса возмущения. Это хорошо видно на теневой фотографии, приведенной на рис. 7 [5]. Источником методической погрешности является принятие в расчетах абсолютной линейности образующей конуса возмущения, тогда как в зависимости от скорости и формы изделия она может иметь заметную кривизну на расстоянии до ~10 калибров изделия. В результате расчеты момента встречи изделия с преградой относятся к точке N', а носовая часть изделия находится в точке N на расстоянии  $d_1$ . Величина этой погрешности определяется из соотношения  $d_1/V_{\text{изд.}}$ . Для условий описанных испытаний величина этой методической погрешности составила  $\Delta T_{\text{вс. м.}} = 0,001$  с. Эта погрешность имеет систематический характер и учитывается в расчетах.

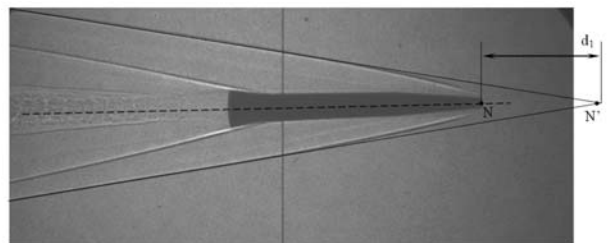


Рис. 7. Теневая фотография обтекания модели изделия [5]

В результате выполненных работ разработаны и опробованы способы определения момента времени встречи изделия с преградой. Эти способы основаны на измерении параметров двух различных видов воздушных волн, создаваемых изделием при подходе и встрече с преградой. Данные, получаемые в результате измерений, позволяют рассчитать момент времени встречи с преградой двумя способами с сопоставимой точностью. Эти факты обеспечивают высокую надежность получения результата. Разработанные способы положены в основу соответствующей методики. Методика унифицирована по средствам измерений (измерения параметров волн различных типов выполняются одной системой измерений), средства измерений масштабируемы, что позволяет комплектовать их состав для получения надежного результата с учетом характеристик испытываемого изделия. Математические модели по-

грешностей позволяют получить ее конкретное значение в зависимости от условий испытаний.

### Литература

1. Красильников В. А. Звуковые волны в воздухе, воде и твердых телах. М.: Наука, 1954.
2. Фабрикант Н. Я. Аэродинамика. М.: Наука, 1964.
3. Пат.2547839, РФ // Бюллетень изобретений.2015. № 10.
4. Тейлор Дж. Введение в теорию ошибок. Пер. с англ. М.: Мир, 1985. С. 272, ил.
5. Герасимов С. И., Файков Ю. И. Теневое фотографирование в расходящемся пучке света // Монография. Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2010. С. 344, ил.