

УДК 534.222; 534.231

Сокол Г. И.

*Днепровский национальный университет имени Олеся Гончара*

## **МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВИДА ИСТОЧНИКОВ АКУСТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ПЕРВЫЕ СЕКУНДЫ СТАРТА РАКЕТ КОСМИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ**

Разработан метод анализа акустических источников излучения при старте ракет космического назначения (РКН) и их акустических полей в первые секунды полета. Метод позволяет определить тип физических моделей акустических полей и применить к расчету их характеристик известные математические модели. Метод базируется на основе определения волнового параметра  $kR$  источника акустического излучения и позволяет привести обоснованные данные по уровням звуковых давлений и интенсивности в конкретных точках воздушного пространства.

**Ключевые слова:** разработка, метод, анализ, акустические излучения, источники.

Розроблений метод аналізу акустичних джерел випромінювання при старті ракет космічного призначення (РКП) та їх акустичних полів у перші секунди польоту. Метод дозволяє визначити тип фізичних моделей акустичних полів та залучити до розрахунків їх характеристик відомі математичні моделі. Метод базується на ґрунті визначення хвильового параметру  $kR$  джерела акустичного випромінювання і дозволяє привести обґрунтовані дані з рівнів звукових тисків та інтенсивності у конкретних точках повітряного середовища.

**Ключові слова:** розробка, метод, аналіз, акустичні випромінювання, джерела.

**A method of analysis of the acoustic sources and of radiation during the launch of space rockets (SR) and their acoustic fields in the first seconds of flight was developed. The method makes it possible to determine the type of physical models of acoustic fields and to apply known mathematical models to the calculation of their characteristics. The method is based on the determination of the wave parameter  $kR$  of the source of acoustic radiation and allows us to provide valid data on the levels of sound pressure and intensity at specific points in air.**

**Keywords:** development, method, analysis, acoustic radiation, sources.

**Актуальность проблемы.** После запуска двигателя при движении ракеты в атмосфере генерируются разнообразные акустические излучения, в атмосфере формируются акустические поля. Одной из актуальнейших проблем здесь является проведение анализа и оценки уровней интенсивности акустических излучений, особенно на инфразвуковых частотах. Кроме оценки воздействия акустического давления на оболочку корпуса, проникающего акустического излучения внутрь полостей отсеков и воздействия его на гибкие связи как внутри приборов, так и на их крепления, необходимо оценить влияние акустических излучений на здоровье населения расположенных на некоторых расстояниях населенных пунктов и обслуживающего персонала космодромов. Поэтому необходимо создать метод, который позволит выявить особенности и

определить направления исследований акустического излучения на основе существующих представлений о генерировании, распространении и направленности как звуковых волн, так и инфразвука. Этим определяется актуальность темы, выбранной для исследования.

**Целью данной работы** является разработка метода анализа акустических источников излучения при старте ракет космического назначения (РКН) и их акустических полей в первые секунды полета.

**Известные методы анализа акустических излучений и их источников.**

На основе известных методов анализа акустических излучений и существующих представлений о генерировании и распространении звуковых волн необходимо выявить особенности и определить направления исследований акустического излучения при старте РКН.

Известные работы [1-3] рассматривают отдельные аспекты и конкретные частные задачи максимальных акустических нагрузок на ракету при старте. Здесь не представлена общая методология определения типа самих акустических источников и их излучений.

Основополагающие монографии по акустике на основе *аналитических методов* позволяют провести расчеты, составить методики измерений и создать акустические приборы для регистрации линейных (смещения, звукового давления, колебательной скорости) и энергетических (интенсивности) характеристик акустических полей излучателей звука (С. Н. Ржевкин, М. А. Сапожков, В. Н. Тюлин, В. Т. Гринченко, В. В. Вовк, В. Т. Мацыпура) [4-7]. Однако практика требует решения отдельных научно-технических проблем по анализу акустических излучений от источников различной физической природы. Основополагающие теории, изложенные в [4-7], позволили Г. И. Сокол в [8] создать классификацию уже разработанных излучателей инфразвуковых волн.

В настоящий момент известные *методы, основанные на использовании информации, регистрируемой только приемниками давления*, достигли предельных возможностей [9]. В своей докторской диссертации (1905г.) Н.А. Умов указал [9] на важность характеристики акустического поля, полученной путем перемножения мгновенных значений давления в волне и колебательной скорости движения частиц среды, которая известна как вектор Умова.

Поэтому в [9, 10, 11] описаны *векторно-фазовые методы* в акустике. Этот метод применим для регистрации акустических полей в гидроакустике. Он используется при решении задач: обнаружение слабых источников сигнала на фоне шумов, биоакустики, экологии, в предсказании землетрясений. На основе векторно-фазовых методов ведется обнаружение и пеленгование объектов в гидроакустике, проводится выявление их классификационных признаков. Определяется характеристика направленности излучателей.

Векторно-фазовые структуры сигналов импульсного типа позволяют определить источники акустического излучения в атмосфере.

А. И. Иванников [11] разработал *векторно-фазовый метод* для анализа особенностей возбуждения шумовых инфразвуковых акустических полей в замкнутых объемах.

В. А. Гордиенко разработал *фазоамплитудный метод* для регистрации акустических полей от движущихся морских объектов [9].

*Методы исследования явления взрыва* в горных породах основаны на основных закономерностях формирования и распространения упругих колебаний и волн, возникающих в горной породе от взрыва [12].

С 30-х годов 20-ого века получили распространение акустические технические устройства, предназначенные для возбуждения звуковых волн в различных средах путем преобразования электрического сигнала в энергию звукового поля. На сегодняшний день создано много различных не похожих друг на друга излучателей звука, в виду чего, их принято делить на типы и виды. Разработан метод такого разделения.

*На типы* излучатели делятся в зависимости от принципа преобразования электрического сигнала в акустический.

*На виды* излучатели делятся в зависимости от конструктивных особенностей, наблюдающихся внутри типа.

Согласно разработанному методу наиболее распространены следующие типы и виды звукоизлучателей. Это: электромагнитные; электродинамические (катушечные, ленточные, изодинамические, ортодинамические); электростатические (конденсаторные, электретные); пьезоэлектрические (пьезокерамические, биморфные).

Кроме вышеназванных типов и видов излучателей существуют и другие, менее традиционные.

Внутри типа, в зависимости от конструктивных особенностей, электродинамические излучатели делятся на виды: катушечные (диффузорные); с уравновешенным якорем («арматурные»); ленточные; изодинамические; ортодинамические; излучатели Хейла [13]. То есть в [13] разделены на виды и типы уже широко известные на практике излучатели звука. Выбор акустических излучающих устройств для оснащения компьютеров вынесен сейчас в отдельный раздел, который получил название компьютерная акустика.

*Методы вычислительной техники* нашли широкое применение в современной акустике, например, они представлены в [14, 15]. Но их применяют для визуализации структур волновых полей, когда известна геометрия границ и физические свойства области, где волны распространяются. При использовании этих методов обычно местоположение излучателей и приемников контролируется.

### **Физические модели акустических полей.**

Формирование акустического поля определяется на основе известных представлений, изложенных в основополагающих работах по акустике [4-7]. Характер поля зависит прежде всего от типа акустических источников.

Предположительно при движении ракеты в атмосфере возможно использовать следующие модели:

- точечного излучения (монополей);
- акустических полей, генерируемых в среде при силовом воздействии на жесткую поверхность, находящуюся в состоянии движения, или среду, и характеризующихся потенциалом Лэмба;
- акустического излучения и полей при колебаниях пластин и оболочек различной формы, протяженности и площади;
- излучений, возникающих при истечении струй из сопел;
- акустического излучения, генерируемого при взаимодействии подвижной обтекающей среды с поверхностями твердых тел различной формы;
- возбуждения и распространения акустических колебаний внутри газовых и жидкостных полостей с учетом особенностей конструктивных схем исполнения оболочек, выявление резонансов;
- монохроматического и импульсного излучения.

Знание частоты излучения акустических волн позволяет применить известные в классической акустике *модели длинноволновых и коротковолновых излучений* [4, 5]. Это существенный фактор, который дает представления о направленности акустического поля и позволяет упростить расчеты величины звукового давления в зависимости от изменения расстояний от источника колебаний до интересующей точки.

### **Применение моделей *длинноволновых и коротковолновых излучений* для оценки излучателей звука, появившихся в первые секунды старта РКН.**

Звуковое давление в определенной точке акустического поля, окружающего ракету, может быть рассчитано на основе известных теоретических положений классической акустики, если расстояние  $r$  превышает длину волны  $\lambda$  излучаемых звуковых колебаний, то есть в зоне дальнего акустического поля.

Рассмотрим характеристики такой РКН, для которой известно, что частота колебаний, зарегистрированная вибродатчиками телеметрической аппаратуры на участке выведения, имеет диапазон  $f = 0,3-3000$  Гц [16]. Так как длина волны  $\lambda$  излучаемых акустических волн равна  $\lambda = c_0 / f$  (здесь  $c_0$  – скорость звука в воздушной среде, окружающей РКН во время старта), то отсюда следует, что диапазон длин волн, излучаемых от летящей ракеты колебаний, лежит в пределах  $1133\text{ м} - 0,11$  м соответственно. Пространство, где располагается дальнее акустическое поле излучателей, характеризуется начальным значением границы  $r = \lambda$  ( $r$  – расстояние от источника излучения до точки наблюдения). Значения  $r$ , равные  $1133\text{ м} - 0,11$  м, определяют начальную границу дальнего акустического поля от среза сопла ракеты или от каких-либо ее выступающих

частей. Согласно [18] (см. стр. 116) трехступенчатая РКН поднимается на высоту 1124м за первые 20 с полета. В первые 4 и 8 с полета РКН поднимается на высоту 145м и 265м соответственно.

Основным источником шумов при взлете РКН является ее двигательная установка (ДУ). При включении двигателя на невозмущенную ранее атмосферу, окружающую ракету, начинают воздействовать возмущения колебательного характера, генерируемые в потоке продуктов сгорания, истекающего из сопла. В таком случае сечение среза сопла принимается за источник колебаний.

Принимаем диаметр среза сопла за характерный размер поверхности акустического излучателя. В зависимости от частоты излучения и радиуса среза сопла определяется волновой параметр  $kR$  ( $k$ .- волновое число,  $R$  – радиус излучателя) и тип излучателя, низкочастотный или высокочастотный. Это даст возможность руководствоваться критерием в определении типов акустических источников при старте РКН, которые принят в классической акустике.

Необходимо учесть, что старт РКН происходит в пределах зоны стартовых сооружений. Конструкция стартовых сооружений в данном случае вносит коррективы в физическую картину акустических излучений.

### **Влияние на процесс генерации акустического излучения схемы старта РКН**

Схема стартового комплекса и сооружений для каждой ракеты должна быть рассмотрена отдельно. Схема дает возможность перейти к выявлению первичных и вторичных акустических источников акустического излучения. Например, в [16] представлено пусковое устройство (ПУ), с которого стартует ракета-носитель «Зенит» (11К77), общий вид пускового стола с установленной на нем ракетой. Отмечено, что до высоты подъема 4м хвостовой отсек ракеты находится в цилиндрическом заглублении. Величина зазора между движущейся ракетой и стартовым сооружением составляет  $\sim 1$  м. Во время движения хвостового отсека ракеты происходит уменьшение зазора между корпусом ракеты и стаканом стартового сооружения.

В схеме стартового стола также заложен канал, по которому движутся газы, представляющие собой струю продуктов сгорания, что обеспечивает требование осуществления безударного старта.

При изучении акустического излучения можно заметить, что для такой схемы старта характерно отсутствие воздействия струи из продуктов сгорания на окружающую среду вокруг корпуса ракеты в первые  $\sim 1,5$  с полета. На основании представленных данных можно считать незначительным воздействие шума на окружающую среду при полете РН до высоты 4м в первые 1,5 секунды полета.

Возникновение акустического поля от качания ракеты в целом можно также считать отсутствующим, так как согласно данным работы [16] конструкторам системы управления (СУ) обычно удается разработать алгоритм работы СУ на основе требования минимальности перемещения по рысканью хвостового отсека. Это дает возможность избежать существенных колебаний ракеты в целом.

В [17] представлены исследования стабилизации движения РКН «Зенит-3SL», запускаемой в рамках международной программы «Морской старт». При разработке СУ ракеты с целью стабилизации движения с плавучей платформы должны были учитываться дополнительные возмущающие воздействия, обусловленные качкой платформы. Кроме безударности старта здесь были наложены ограничения на положение следов струй двигательной установки на палубе платформы из условий обеспечения допустимых уровней акустического, газодинамического и теплового воздействия. Показано, что было осуществлено устойчивое движение РКН до высот полета 4м, 8м. В [17] отмечено, что была обеспечена техническая устойчивость ракеты в полете до высоты 200м.

Анализ акустического излучения в последующие секунды полета необходимо проводить, опираясь на данные характеристик ракет.

**Волновой параметр излучателей акустических колебаний и влияние его величины на вид акустических излучений.**

В аналитическое выражение волнового размера акустического источника  $kR$  входят  $k$  – волновое число ( $k = 2\pi/\lambda$ ,  $k = 2\pi f/c_0$ ,  $\pi$  - число "π",  $\lambda$  и  $f$  - длина волны и частота излучаемого звука соответственно). Фактор  $kR < 1$  или  $kR > 1$  определяет тип акустического излучения: низкочастотное или высокочастотное. Параметр  $kR = 1$  разграничивает две модели излучения. В некотором приближении можно считать, что при  $kR < 1$  фронт акустического излучения сферический, при  $kR > 1$  фронт имеет форму плоской волны [5]. Волновой параметр определяет соотношение между радиусом излучателя  $R$  и длиной волны звука  $\lambda$ .

**Волновой параметр как характеристика излучения акустических колебаний отверстием газохода**

В первые доли секунд запуска ДУ истекающие газы струи полностью проходят через газоход. Источником акустического излучения следует считать отверстие выхода из газохода в окружающую среду. Известен частотный диапазон колебаний, на которых наблюдаются акустические излучения. Обычно в ракетной технике этот диапазон частот составляет 31,5 – 8000 Гц.

Определение волнового параметра  $kR$  по размерам выходного отверстия газохода дает возможность идентифицировать вид фронта акустического поля.

Рассчитать характеристику звукового давления на некоторых расстояниях от выходного отверстия газохода до стартовой ракеты.

**Модель акустического излучения ДУ как объемного сферического излучателя или излучателя волны с плоским фронтом.**

В данном разделе предложена методика расчета шума ДУ РКН в первые 1,5 - 4,1 секунды полета, позволяющие определить звуковое давление в окружающей среде.

В основе методики расчета лежит моделирование акустического поля от ДУ РКН возможных двух типов излучения. Первый тип – это сферическое излучение от объемного источника, второй тип – излучение акустической волны с плоским фронтом. Определим диапазон частот излучения колебаний, для которого применимо такое моделирование. Сделать это позволяет применение параметра  $kR$  как критерия типа акустического излучения. Значение параметра  $kR = 1$  позволяет разграничить две модели излучения. Далее используем соотношения: при  $kR < 1$  фронт акустического излучения сферический, при  $kR > 1$  фронт имеет форму плоской волны.

В зависимости от диаметра среза сопла, характерного размера поверхности акустического излучателя, определялся тип излучателя. Для диаметра среза сопла и диапазона частот от 31Гц до 8000 Гц определяем волновой размер акустического источника излучения  $kR$ .

Приняв вышесказанное за внимание, следует опираться на значение граничной частоты  $f_{gp}$  [Гц], которая определяется для случая  $kR = 1$  и разделяет два вида акустического поля:  $f < f_{gp}$  Гц - фронт акустической волны сферического типа, то есть источник акустического излучения монополю. Для  $f_{gp} > f$  [Гц] - фронт акустической волны плоского типа.

В основу расчета акустической мощности струи как объемного излучателя звука или излучателя с объемной скоростью. Когда  $f < f_{gp}$  Гц, положена теория излучения звука сиреной.

В модели объемного сферического излучателя фронт сферической волны представляет собой сферическую поверхность, а звуковые лучи, согласно определению фронта волны, совпадают с радиусами сферы [4, 5]. В результате расхождения волн интенсивность звука убывает с удалением от источника.

Сферичность фронта низкочастотного акустического поля предполагает значительное уменьшение величины звукового давления с расстоянием по гиперболическому закону, что представляет собой значительную величину.

Волновое уравнение для этого случая [5]

$$\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = c_0^2 \left( \frac{\partial^2 p}{\partial r^2} \right) + \frac{2\partial p}{r\partial r}, \quad (1)$$

где  $p$  – звуковое давление;

$c_0$  – скорость звука в среде;

$t$  – время;

$r$  – расстояние от центра сферической волны до точки наблюдения.

Частное решение уравнения (1) для расходящейся волны (распространяющейся в положительном направлении) имеет вид

$$p = \frac{p_i}{r} e^{i\omega(t - \frac{r}{c_0})} = p_m e^{i\omega(t - \frac{r}{c_0})}, \quad (2)$$

где  $p_i$  – амплитуда звукового давления на расстоянии, единицы длины от центра сферы;

$p_i = p_m / r$ .  $p_m$  – амплитуда звукового давления на расстоянии единицы длины волны от центра сфера.

Закон убывания интенсивности звука  $I$  в сферической волне квадратичный

$$I = p_m^2 / 2\rho c_0 = I_1 / r^2, \quad (3)$$

где  $I_1 = p_i^2 / \rho c_0$ ,  $\rho$  – плотность.

При увеличении параметра  $kR$  излучателя сферическая волна приближается к плоской. Например, для частоты 100 Гц (длина волны  $\lambda = c_0 / f = 340 / 100 = 3,4$  м) при расстоянии от центра источника звука 0,25 м сдвиг фаз получается равным  $65^\circ$ , а для частоты 5000 Гц ( $\lambda = 6,8$  см) при расстоянии 1 м сдвиг фаз между активной и реактивной составляющими излучения получается уже около  $0,5^\circ$ .

Так как на окружающую среду при работе ДУ РКН действуют вытекающие из сопла газы в виде продуктов сгорания, то можно применить модель акустического излучения от объемного источника в диапазоне частот  $f < f_{gr}$  [Гц]. Тогда акустическое излучение от истекающей струи из ДУ РКН аппроксимируется сферическим излучателем с объемной скоростью.

В модели излучателя, у которого волновой параметр  $kR > 1$  фронт имеет форму плоской волны [5, 6].

Волновое уравнение для этого случая

$$\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = c_0^2 \left( \frac{\partial^2 p}{\partial r^2} \right), \quad (4)$$

где  $p$  – звуковое давление;

$r$  – расстояние от поверхности излучения до точки наблюдения.

Для частот излучения, когда  $f > f_{gr}$  Гц выше до величины 3000 Гц – 8000 Гц, расчеты акустических характеристик в поле следует проводить, руководствуясь волновым уравнением плоской волны (5).



Такое акустическое излучение возможно на участке полета ракеты 1,5 – 20с.

Для расчета акустических характеристик разработаны алгоритм и программа на языке JAVA.

На основе расчета получены зависимости звукового давления от частоты при заданных температурных уровнях внешней среды (-320 С, 200 С и 420 С). Данные расчета показали, что значение уровня звукового давления на частоте ~125 Гц и выше составляет 150-155 дБ для Ду, срез сопла которой составляет 1,5 м.

### **Обсуждение результатов**

Настоящая работа имеет перспективы при выяснении характера акустических полей, генерируемых при старте РКН. При строительстве космодромов и стартовых площадок ракет необходимо выполнить требования воздействия шумов на окружающую среду инфразвукового излучения ниже определенного уровня. *Разработанный метод* определения вида акустических источников при старте РКН дает возможность определить величины амплитуд акустического давления в среде, акустические воздействия на корпус ракеты и направленность акустических полей [17]. *Метод* исследований акустического излучения при старте ракет космического назначения разработан на основе определения волнового параметра  $kR$ .

### **Выводы**

Разработан метод определения вида источников акустического излучения в первые секунды старта ракет космического назначения.

Метод применим для исследований акустических излучений в первые секунды старта РКН и позволяет привести обоснованные данные по уровням звуковых давлений и интенсивности в конкретных точках воздушного пространства вокруг РКН в первые секунды старта.

### **Библиографические ссылки**

1. Дементьев, В.К., Думнов Г.Е., Комаров В.В., Мельников Д.А. О максимальных акустических нагрузках на ракету при старте. [Текст] // Космонавтика и ракетостроение. Научно-технический ж. – 2000. – Вып. 19. – С.44

2. Tsutsumi S., Ishii T., Ut K., Tokudone S., Chuuou-ku Y., Wado K. Acoustic Design of Launch Pad for Epsilon Launch Vehicle // Proceedings of AJCPP2014 . Asian Joint Conference on Propulsion and Power, March 5-8, 2014, Jeju Island, Korea. AJCPP2014-090.

3. Panda, J., Mosher R., Porter D.J. Identification of Noise Sources during Rocket Engine Test Firings and a Rocket Launch a Microphone Phased-Array // NASA / TM-2013-216625, December 2013. – P. 1-20.

4. Ржевкин, С.Н. Курс лекций по теории звука. [Текст] – М.: МГУ, 1960. – 261 с.
5. Сапожков, М.А. Электроакустика. [Текст] – М.: Связь, 1978. – 272 с.
6. Тюлин, В.Н. Введение в теорию излучения и рассеяния звука. [Текст] – М.: Наука, 1976. – 253 с.
7. Грінченко В. Т., Вовк В. В., Маципура В. Т. Основы акустики. [Текст] – Київ: Науково-виробниче підприємство «Видавництво «Наукова думка» НАН України, 2007. – 640 с.
8. Сокол, Г.И. Особенности инфразвуковых процессов в инфразвуковом диапазоне частот [Текст]: науч. монография. – Днепропетровск: Промінь, 2000. – 136 с.
9. Гордиенко В.А. [Текст] Векторно-фазовые методы в акустике. – М.: Физматлит, 2007. – 480 с.
10. Гордиенко В.А. Векторно-фазовые методы в акустике. [Текст] / В. А. Гордиенко, Л. Н. Захаров. – М.: Наука, 1989. – 222 с.
11. Иванников А.И. Метод исследования структуры звукового поля в малых замкнутых объемах воздуха: Дис... канд. физ.-мат. наук – М.: МГУ, 1983. – 140 с.
12. Шкуратник В. Л. Методы и средства изучения быстропротекающих процессов. Учебник для вузов [Текст] / В. Л. Шкуратник, А. С. Вознесенский, И. В. Колодина – М.: Издательство Московского государственного горного университета, 2003. – 309 с.
13. Излучатели звука, типы и виды. [Электронная версия] / [techadviser.ru/articles/izluchатели-zvuka-tipy-i-vidu-izluchatelej/](http://techadviser.ru/articles/izluchатели-zvuka-tipy-i-vidu-izluchatelej/)
14. Завадский В. Ю. Метод конечных разностей в волновых задачах акустики. [Текст] – М.: Наука, 1982. – 274 с.
15. Гринченко В. Т. Антисимметричные колебания полуслоя с защемленным торцом / В. Т. Гринченко, Н. С. Городецкая, И. В. Старовойт // Акуст. вісник, 2009. – 12, № 1. – С. 32–42.
16. Игдалов, И. М., Шептун Л. Д., Поляков Н.В., Шептун Ю.Д. Ракета как объект управления [Текст] / Под ред. акад. С.Н. Конюхова. – Днепропетровск: АРТ-ПРЕСС, 2004. – 544с.
17. Фролов, В. П. Акустические излучения при старте ракет космического назначения в первые секунды полета [Текст] / Г. И. Сокол, В. П. Фролов // 6-я международная конференция «Космические технологии: настоящее и будущее», 23-26 мая 2017г., Днепр, Украина: Тезисы докладов. - Днепр: ДП «КБ «Южное» им. акад. М.К. Янгеля», 2017. – С. 37.
18. Игдалов, И. Динамическое проектирование ракет. Монография. [Текст] / Под ред. акад. С.Н. Конюхова // И. М. Игдалов, Л. Д. Кучма, Н.В. Поляков, Ю.Д. Шептун – Днепропетровск: Изд-во Днепрпетр. нац. ун-та, 2010. – 264с.

*Надійшла до редакції 19.04.2018*