

<https://doi.org/10.15407/knit2019.04.036>

УДК 534.21

Г. И. Сокол, В. Е. Некрасов, С. Ю. Кириченко, Е. С. Мироненко, А. А. Хорищенко

Днепропетровский национальный университет имени Олеся Гончара, Днепро, Украина

ВИЗУАЛИЗАЦИЯ АКУСТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ОТ ДВИГАТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ РАКЕТЫ В ПЕРВЫЕ СЕКУНДЫ СТАРТА

Важным моментом в определении воздействия шумов на окружающую среду при старте ракеты космического назначения (РКН) является составление методики расчета уровней звукового давления. На стадии эскизного проектирования ракеты космического назначения уже известны энергетические и конструктивные данные о ракете. Главным источником шума является двигательная установка ракеты. При известных акустических характеристиках можно провести наглядную визуализацию распространения шумов в окружающей среде. При решении этой задачи использованы методы исследований: математическое моделирование в рамках линейной акустики; применение рядов Фурье, программные среды Fortran, MathCad. Для визуализации данных расчета применена программа Shown32. В программе производятся расчеты звукового давления p в децибелах в точке, находящейся на расстоянии r от источника излучения, а также под углом направленности к источнику θ . Визуализация расчетных данных требует преобразования их в формат, используемый программой Shown32. Первоначально задаются параметры сетки, максимальное, минимальное значения и количество делений по осям. Проводится вычисление количества узлов. Расчет в программном комплексе Fortran величин звукового давления выполнен в полярной системе координат, когда звуковое давление зависело от расстояния и полярного угла. Для перехода в визуализацию на программе Shown32 требовалось перейти к декартовой системе координат. Выбраны ячейки сетки в форме четырехугольников, которые являются полигонами. Вершины ячеек в программе определяются. Создается оператор, который позволяет вывести данные на печать. Выводимым параметром присваиваются обозначения. В данном случае это уровни звукового давления в децибелах. Картина распределения уровней звукового давления представлена цветной шкалой.

Ключевые слова: визуализация, акустические излучения, двигательная установка, ракета, Shown32.

ВВЕДЕНИЕ

Важным моментом в определении воздействия шумов на окружающую среду при старте ракеты космического назначения (РКН) является определение реального уровня шумов, представляющих собой акустические воздействия на корпус ракеты, стартовые сооружения и окружающую среду на космодромах. В ракетно-космической отрасли уже накоплен значительный опыт по определению и прогнозированию характера аку-

стических нагрузок, порождаемых при пусках ракет. Анализ реальных фонограмм, содержащих записи стартовых шумов, позволяют получить важную информацию о деталях частотных спектров. Фонограммы записаны при старте ракет типа «Союз-СТ» и метеорологической ракете VSB-30. Численные значения интегрального уровня шума при старте ракетополетителя на расстоянии от оси ракеты 3 м на уровне земли достигают 160...165 дБ [1]. Они отображают особенности процессов генерации, распространения и воздействие звука на окружающую среду. Получение таких данных было сопряжено с не-

© Г. И. СОКОЛ, В. Е. НЕКРАСОВ, С. Ю. КИРИЧЕНКО,
Е. С. МИРОНЕНКО, А. А. ХОРИЩЕНКО, 2019

обходимостью проведение дорогостоящих натурных стендовых экспериментальных исследований. Поэтому составление методики расчета уровней звукового давления стало важной задачей. На стадии эскизного проектирования РКН уже известны энергетические и конструктивные данные о ракете. Главным источником шума является двигательная установка (ДУ) ракеты. При известных акустических характеристиках можно провести наглядную визуализацию распространения шумов в окружающей среде [6, 7].

При старте РКН в атмосфере возникают разнообразные по характеру излучения акустические поля. Поэтому необходимо выявить особенности и определить направления исследований акустического излучения при старте РКН на основе современных представлений о генерировании и распространении звуковых волн.

Известны работы [2, 9], в которых рассмотрены аспекты максимальных акустических нагрузок на ракету при старте. Все они рассматривают отдельные конкретные частные задачи. Применены аналитические, экспериментальные методы исследований, а также проведено моделирование распространения акустических колебаний численными методами.

В настоящее время ученые решают различного рода задачи акустики с последующей визуализацией полученных результатов по звуковым давлениям, скоростям, уровням шумов. Так, А. А. Приходько в своих работах проводит визуализацию полученных результатов расчета по аэродинамике [8]. В работе [3] А. А. Пилипенко провел визуализацию трансзвукового турбулентного обтекания аэродинамических профилей, что позволяет более наглядно оценить полученные данные не только по цветовой гамме, но и с использованием шкалы соответствия цветов уровням давлений. В работе [5] Д. А. Редчиц визуализировал обтекание потоком лопастей ротора в ветроэнергетике. В перечисленных работах визуализация акустических шумов при старте ракет не проводилась.

Возможность визуальной оценки характеристик акустического излучения на основе предварительного программирования и расчета характеристик является важным моментом в решении

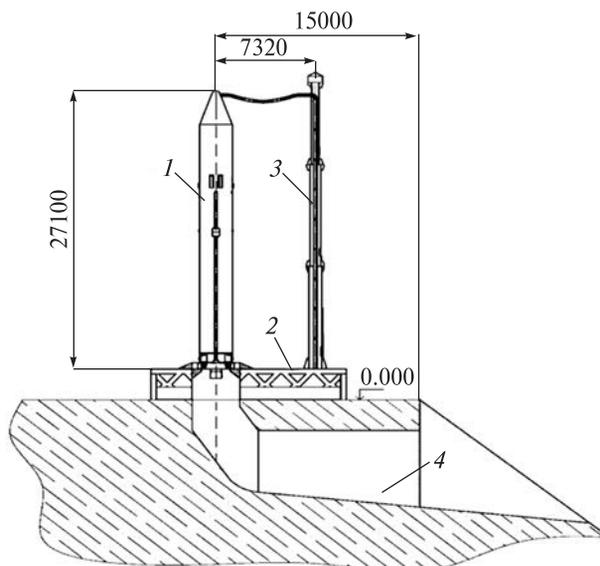


Рис. 1. РКН на стартовой площадке: 1 — ракета, 2 — стартовый стол, 3 — стойка, 4 — газоход

подобной задачи. Это определяет актуальность выбранной темы настоящей работы.

Целью данной работы является визуализация акустических полей при старте РКН.

Методика расчета шумов. Для расчета характеристик звука в зависимости от расстояния и удаления от источника звука, угла направленности характеристики, номера гармоники на частотах от 31.5 до 8000 Гц на программном языке Fortran написана специальная программа [7]. В программе производятся расчеты звукового давления p в дБ в точке, находящейся на расстоянии r от источника излучения, а также под углом направленности к источнику θ .

На рис. 1 представлен общий вид ракеты на стартовой площадке.

Исходные параметры для расчета: c — скорость звука, R — тяга на срезе сопла, θ — угол характеристики направленности, r — расстояние от источника излучения, f — частота звука, m — номер гармоники.

В отдельном массиве записаны номинальные значения тяги на срезе сопла R для определенного промежутка времени (4...8 с) с шагом изменения времени 1 с. Значение тяги двигателя известно и задается отдельным массивом: $R_1 = 180833$, $R_2 = 185232$, $R_3 = 189673$, $R_4 = 194240$, $R_5 = 198875$ кгс.

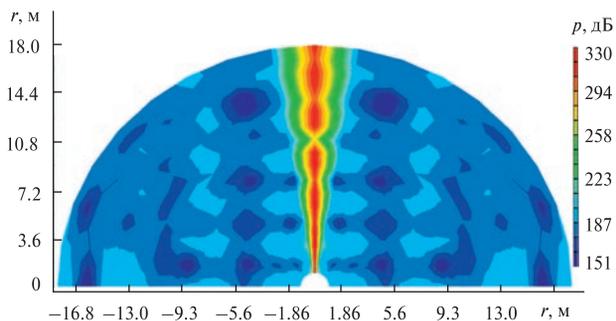


Рис. 2. Картина распределения уровней звукового давления в децибелах

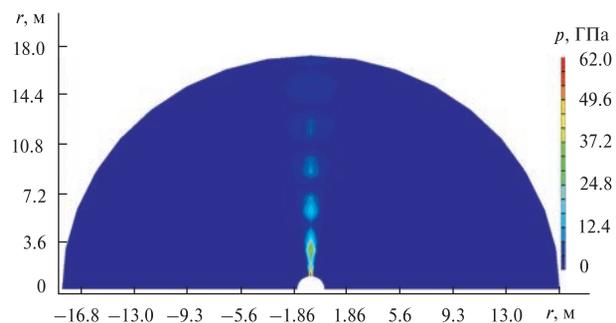


Рис. 3. Картина распределения уровней звукового давления в паскалях

Для упрощения расчета сделан ряд допущений:

- расчет звукового давления проводится для 10 первых гармоник ($m = 1...10$),
- скорость звука вводится постоянной величиной, берется ее значение для температуры воздуха окружающей среды $20\text{ }^\circ\text{C}$ ($c = 340\text{ м/с}$),
- угол характеристики направленности звукового давления изменяется в пределах $\theta = 0...180^\circ$,
- частота звука изменяется в пределах $f = 31.5...8000\text{ Гц}$ в зависимости от номера гармоники m , частота нулевой моды равна 31.5 Гц . Изменение частоты задано во внутреннем цикле. С увеличением шага увеличивается. Например, в диапазоне частот от 31.5 до 157.5 Гц шаг составляет 31.5 Гц , а в диапазоне частот больше 3150 Гц шаг составит 315 Гц . Эти значения при необходимости можно изменять, тем самым настраивая необходимую точность данных, получаемых при расчетах.

Далее проводится вычисление числа z :

$$z = kr,$$

где r — расстояние от источника излучения ($r = 2...18\text{ м}$), k — волновое число.

Затем проводится расчет звукового давления p в определенной точке излучения, на расстоянии r от источника, под заданным углом $m\theta$ направленности для определенного номера гармоники m . В математическое выражение для звукового давления p входит функция косинус, которая при определенном значении угла $m\theta$ может принимать отрицательные значения. Поэтому расчет проводится по модулю:

$$p = \left| \left(\frac{f}{c} \cos \left(m\theta \cdot \frac{\pi}{180} \right) R_i \left(\frac{1}{z} \cos z + \sin z \right) \right) \right|.$$

Переводим p в децибелы на основе выражения

$$p, \text{ дБ} = 20 \lg(p/0.00002).$$

Все полученные в текущей итерации цикла значения записываются в отдельный текстовый документ, который позволяет извлечь результаты для дальнейшего использования.

Визуализация результатов расчетов. Визуализация расчетных данных звукового давления p на основе программы, написанной на языке Fortran, проводится преобразование их в формат, используемый программой Shown32.

Расчет в программном комплексе Fortran величин звукового давления выполнен в полярной системе координат, когда звуковое давление зависит от расстояния и полярного угла. Для осуществления визуализации в программе Shown32 требовалось перейти к декартовой системе координат.

Первоначально задаются параметры сетки, максимальное, минимальное значения и количество делений по осям, вычисление количества узлов. Выбраны ячейки сетки в форме четырехугольников, которые являются полигонами. Вершины ячеек в программе определяются. Создается оператор, который позволяет вывести данные на печать. Выводимым параметром являются уровни звукового давления в децибелах.

На рис. 2 приведена картина распределения уровней звукового давления в дБ.

На рис. 3 показана картина распределения уровней звукового давления в Па.

Обсуждение результатов. Получены картины визуализации распределения шумов при старте РКН. Картины выполнены на основе цветных шкал. Данные расчетов приведены для частот от

31.5 до 8000 Гц. Из рис. 2 и 3 видно, что излучение шума наибольшей интенсивности наблюдается вдоль оси струи.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Для расчета характеристик шума в зависимости от расстояния и удаления от источника, угла направленности и номера гармоники на языке Fortran написана программа. На основе программы проведены расчеты звукового давления в паскалях и в децибелах в определенной точке.

2. Для визуализации расчетных данных использована программа Shown32.

3. Видно, что максимальные уровни шумов наблюдаются вдоль оси струи двигательной установки РКН.

ЛИТЕРАТУРА

1. Батутина Т. Я. Акустическое нагружение окружающей среды, возникающее при старте ракетносителей, и связанные с ним проблемы экологии. *Наук. читання «Дніпровська орбіта-2018»*. Дніпро: НЦАОМУ, 2018. С. 172—175.
2. Дементьев В. К., Думнов Г. Е., Комаров В. В., Мельников Д. А. О максимальных акустических нагрузках на ракету при старте. *Космонавтика и ракетостроение*. 2000. 19. С. 44—55.
3. Пилипенко А. А., Полевой О. Б., Приходько А. А. Численное моделирование влияния числа Маха и угла атаки на режимы трансзвукового турбулентного обтекания аэродинамических профилей. *Ученые записки ЦАГИ*. 2012. Т. 43, № 1. С. 1—31.
4. Приходько А. А. *Компьютерные технологии в аэродинамике и тепломассообмене*. Киев: Наук. думка, 2003. 382 с.
5. Редчиц Д. А. *Численное моделирование аэродинамики роторов вертикально-осевых ветроэнергетических установок на основе нестандартных уравнений Навье-Стокса*: Дис. канд. физ-мат. наук. Днепропетровск, 2006. 250 с.
6. Сокол Г. И. Моделирование характеристик акустических полей жидкостных ракетных двигателей на основе представлений Лэмба. *Проблемы высокотемпературной техники: сб. науч. тр.* Д.: Акцент ПП. 2014. С. 23—30.
7. Сокол Г. И., Кириченко С. Ю., Мироненко Е. С. Влияние на окружающую среду инфразвукового шума от ракетных двигателей при старте ракетносителя. *Наукові читання «Дніпровська орбіта-2016»*, Дніпропетровськ, 20—22 жовтня 2016: зб. тез. Дніпро: НЦАОМУ, 2016. С. 66—71.

8. Prikhod'ko A. A., Alekseenko S. V. Numerical Simulation of the Processes of Icing on Airfoils with Formation of a “Barrier” Ice. *Journal of Engineering Physics and Thermophysic*, May 2014, 87(3), 598—607. doi: 10.1007/s10891-014-1050-0
9. Tsutsumi S., Ishii T., Ut K., Tokudone S., Chuouoku Y., Wado K. Acoustic Design of Launch Pad for Epsilon Launch Vehicle. *Proc. AJCPP2014*. Asian Joint Conference on Propulsion and Power, March 5—8, 2014, Jeju Island, Korea. AJCPP2014-090.

Стаття надійшла до редакції 04.07.2019

REFERENCES

1. Batutina T. Ja. (2018). Acoustic loading of the environment arising at the launch of the rocket carriers and the environmental problem associated with it. Scientific readings «Dniprovsk orbita-2018». Dnipro: NCAOMU.
2. Dement'ev V. K., Dumnov G. E., Komarov V. V., Mel'nikov D. A. (2000). On the maximum acoustic loads on the rocket at launch. *About the maximum acoustic loads on the rocket at launch*, 19, 44—55.
3. PiliPENko A. A., Polevoj O. B., Prihod'ko A. A. (2012). Numerical simulation of the influence of the Mach number and the angle of attack on the modes of transonic turbulent flow around aerodynamic profiles. *Scientific notes TsAGI*, 43(1), 1—31.
4. Prihod'ko A. A. (2003). *Computer technologies in aerohydrodynamics and heat and mass transfer*. Kiev: Naukova dumka.
5. Redchic D. A. (2006). *Numerical modeling of the aerodynamics of rotors of vertical-axis wind power plants based on non-standard Navier-Stokes equations*: Dis. Cand. Phys. of sciences. Dnepropetrovsk.
6. Sokol G. I. (2014). Modeling of the characteristics of the acoustic fields of liquid rocket engines based on Lamb's ideas. *Problems of high-temperature technology: a collection of scientific papers*. D.: Akcent PP.
7. Sokol G. I., Kirichenko S. Ju., Mironenko E. S. (2016). Influence on the environment of infrasound noise from rocket engines at launch of launch vehicle. *Scientific readings “Dniprovsk orbit-2016”*. Dnipro: NCAOMU.
8. Prikhod'ko A. A., Alekseenko S. V. (May 2014). Numerical Simulation of the Processes of Icing on Airfoils with Formation of a “Barrier” Ice. *Journal of Engineering Physics and Thermophysic*, 87(3), 598—607. doi: 10.1007/s10891-014-1050-0.
9. Tsutsumi S., Ishii T., Ut K., Tokudone S., Chuouoku Y., Wado K. Acoustic Design of Launch Pad for Epsilon Launch Vehicle. *Proc. AJCPP2014*. Asian Joint Conference on Propulsion and Power, March 5—8, 2014, Jeju Island, Korea. AJCPP2014-090.

Received 04.07.2019

Г. І. Сокол, В. Е. Некрасов, С. Ю. Кіриченко,
Е. С. Мироненко, О. А. Хорищенко

Дніпровський національний університет
ім. Олеся Гончара, Дніпро, Україна

ВІЗУАЛІЗАЦІЯ АКУСТИЧНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ ВІД РУХОВОЇ УСТАНОВКИ РАКЕТИ У ПЕРШІ СЕКУНДИ СТАРТУ

Важливим моментом у визначенні впливу шумів на навколишнє середовище при старті ракети космічного призначення (РКП) є складання методики розрахунку рівнів звукового тиску. На стадії ескізного проектування ракети космічного призначення вже відомі енергетичні і конструктивні дані про ракету. Головним джерелом шуму є рухова установка ракети. При відомих акустичних характеристиках можна провести наочну візуалізацію поширення шумів у навколишньому середовищі. При вирішенні цього завдання використані методи досліджень: математичне моделювання в рамках лінійної акустики; застосування рядів Фур'є, програмні середовища Fortran, MathCad. Для візуалізації даних розрахунку застосована програма Shown32. У програмі проводяться розрахунки звукового тиску p в децибелах в точці, що знаходиться на відстані r від джерела випромінювання, а також під кутом спрямованості до джерела θ . Візуалізація розрахункових даних вимагає перетворення їх у формат, який використовується програмою Shown32. Спочатку задаються параметри сітки, максимальне, мінімальне значення і кількість поділів по осях. Проводиться обчислення кількості вузлів. Розрахунок в програмному комплексі Fortran величин звукового тиску виконаний в полярній системі координат, коли звуковий тиск залежить від відстані і полярного кута. Для переходу в візуалізацію на програмі Shown32 потрібно перейти до декартової системі координат. Обрані осередки сітки в формі чотирикутників, які є полігонами. Вершини осередків в програмі визначаються. Створюється оператор, який дозволяє вивести дані на друк. Виведеним параметром присвоюються позначення. В даному випадку це рівні звукового тиску в децибелах. Картина розподілу рівнів звукового тиску представлена кольоровою шкалою.

Ключові слова: візуалізація, акустичне випромінювання, рухова установка, ракета, Shown32.

G. I. Sokol, V. E. Nekrasov, S. Yu. Kirichenko,
E. S. Mironenko, A. A. Khorishchenko,

Oles Honchar Dnipro National University,
Dnipro, Ukraine

VISUALIZATION OF ACOUSTIC RADIATION FROM THE ROCKET PROPULSION SYSTEM IN THE FIRST SECONDS OF THE LAUNCH

An important factor in determining the impact of noise on the environment at the moment of the space rocket launch is the compilation of a technique for calculating sound pressure levels. At the stage of the preliminary design of a rocket carrier, the energy and structural data of the rocket are already known. The main source of noise is the propulsion system of the rocket. With known acoustic characteristics, visualization of noise propagation in the environment can be visualized. When solving this problem, we use mathematical modeling in the framework of linear acoustics, Fourier series, Fortran software, MathCad. Shown32 is used to visualize data of the calculation. The program calculates the sound pressure p in decibels at a point located at a distance r from the radiation source and at an angle to the source θ . Visualization of calculated data requires their conversion into a format used in Shown32. Initially, the grid parameters, the maximum, minimum values, and the number of divisions along the axes are set. Further, the number of nodes is calculated. Calculation of the sound pressure in the Fortran software package is performed in the polar coordinate system as the dependence of the pressure on the distance and the polar angle. The visualization in Shown32 requires the Cartesian coordinate system. Grid cells are selected in the form of quadrilateral polygons. The program then determines the cell vertices. An operator is created that allows printing data. Displayed parameters are assigned notation. In this case, these are the sound pressure levels in decibels. The distribution pattern of the sound pressure levels is represented by a color scale.

Keywords: visualization, Acoustic radiation, Movement installation, rocket, Shown32.