

А. С. Пушкин, И. А. Яицков

ДВИГАТЕЛЬ КАК ИСТОЧНИК АКУСТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ВОЗДУШНУЮ СРЕДУ МАШИННОГО ЗАЛА

Двигатель выступает не только источником механической энергии, но и мощным генератором акустического излучения. Его работа сопряжена с комплексом физических процессов, которые неизбежно порождают звуковые волны, распространяющиеся в воздушную среду помещения. Это явление требует детального рассмотрения, поскольку шум оказывает прямое влияние на условия труда персонала, надежность работы оборудования и акустический климат всего здания. Понимание природы акустического излучения двигателя открывает путь к целенаправленному управлению шумовым фоном. Первым и наиболее эффективным методом является воздействие на источник непосредственно. Это предполагает совершенствование конструкции двигателя: применение более жестких блоков цилиндров, оптимизацию формы камер сгорания для снижения скорости нарастания давления, использование демпфирующих вставок в поршнях и шатунах, а также внедрение прецизионных систем впрыска, минимизирующих детонацию.

Ключевые слова: акустическая безопасность, обкатка двигателей, спектр шума, производственная среда, двигатель внутреннего сгорания

Для цитирования: Пушкин, А. С. Двигатель как источник акустического излучения в воздушную среду машинного зала / А. С. Пушкин, И. А. Яицков // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2026. – № 1. – С. 80–85. – DOI 10.46973/1818-5509_2026_1_80.

Двигатель внутреннего сгорания или газотурбинная установка в условиях машинного зала представляет собой сложный источник акустического излучения, который формирует устойчивое шумовое поле, воздействующее на воздушную среду помещения. Физическая природа этого излучения обусловлена несколькими одновременно действующими механизмами.

В первую очередь, это процессы сгорания топлива в цилиндрах или камерах сгорания, которые порождают резкие перепады давления, распространяющиеся в виде акустических волн через элементы конструкции – блок цилиндров, головку блока, картер, а также впускные и выпускные тракты. Частотный состав этого шума широк: от низкочастотных составляющих, связанных с частотой вспышек в цилиндрах, до высокочастотных, обусловленных турбулентностью газового потока и детонационными явлениями.

Вторым значимым источником является работа механизмов газораспределения, кривошипно-шатунного механизма и сопряженных деталей. Механические вибрации, возникающие при возвратно-поступательном движении поршневой группы или вращении ротора с лопатками, передаются на корпусные детали и фундамент, заставляя их совершать упругие колебания, которые в свою очередь излучают звук в окружающий воздух. Газодинамические шумы от работы впускных и выпускных клапанов, воздушных фильтров и систем турбо наддува, также вносят значительный вклад, создавая турбулентность и вихревые потоки, которые преобразуются в акустическую энергию. Каждый из источников обладает своей спектральной характеристикой, однако в совокупности они формируют широкополосный шум с доминированием низкочастотных составляющих, которые наиболее трудно поддаются ослаблению и эффективно распространяются в замкнутом объеме

машинного зала. Металлические поверхности, обладая высокой жесткостью, эффективно передают вибрацию в воздух, особенно в среднем и высоком частотных диапазонах. Именно эти механические источники вносят основной вклад в общий шумовой фон машинного зала на частотах выше 500 Гц.

Не менее существенным акустическим излучателем выступают впускная и выпускная системы. При движении потоков воздуха и отработавших газов возникают пульсации давления, которые, распространяясь по воздухопроводам, порождают аэродинамический шум. Технические параметры двигателя существенно определяют характеристики его акустического излучения: мощность двигателя и частота вращения вала или ротора напрямую коррелируют с общим уровнем звуковой мощности: увеличение числа оборотов приводит к более частым циклам сгорания и увеличению интенсивности вибраций, что повышает уровни звука; тип топлива и конструктивные особенности камеры сгорания влияют на жесткость процессов сгорания - дизельные двигатели с их характерным «жестким» сгоранием создают более импульсный шум с преобладанием высокоэнергетических ударных волн по сравнению с искровыми бензиновыми двигателями; степень сжатия и системы рециркуляции отработавших газов также модифицируют спектр шума, добавляя или нивелируя отдельные частотные полосы. В газотурбинных установках доминантой является шум от работы компрессора и турбины, который имеет более широкий спектр. Этот гул, несмотря на наличие глушителей, способен распространяться на значительные расстояния и является одной из главных проблем при проектировании шумозащиты машинного зала.

Особого внимания заслуживает излучение шума корпусными деталями двигателя и его агрегатами. Картер, крышки, поддоны, масляные и водяные насосы, генераторы, вентиляторы - все эти элементы, вибрируя, работают как мембраны, излучающие звук. Материалы корпуса двигателя - чугун, алюминиевые сплавы или сталь - также влияют на демпфирование вибраций и, как следствие, на эффективность преобразования механической энергии в звуковую. Вентилятор системы охлаждения, например, создает интенсивный аэродинамический шум от лопастей, который имеет широкий спектр и часто доминирует на средних частотах. Шум от работы топливной аппаратуры носит характер ритмичных стуков, особенно хорошо слышимых вблизи двигателя.

Каждый из этих источников имеет свою направленность излучения. Выпускной тракт излучает преимущественно в сторону выхлопного отверстия, корпусные детали — во всех направлениях, но с разной интенсивностью. Впускной тракт направляет шум в сторону воздухозаборника. В результате в машинном зале формируется сложное акустическое поле с неравномерным распределением уровней звукового давления. Вблизи двигателя уровень шума может достигать 110 – 120 дБА и более, снижаясь по мере удаления, но оставаясь опасным для слуха человека. Двигатель, излучает акустическую энергию во внутренний воздушный объем машинного зала, который имеет форму прямоугольного параллелепипеда. В этом случае, звуковое давление, создаваемое каждым двигателем, определяется по формуле:

$$P_i = \frac{\rho_0 C_0^2 Q_0}{\sqrt{Z} V} \sum_N \frac{\omega_i^2}{(2\omega_N \delta_N)^2 + (\omega_N^2 - \omega_i^2)^2} \quad (1)$$

где ρ_0 и C_0 – плотность воздуха, кг/м³ и скорость звука в воздухе, м/с; Q_0 – производительность источника шума, м³/с; V – объем производственного помещения, м³; ω_N – круговые собственные частоты внутреннего воздушного объема, 1/с; ω_i – среднегеометрические частоты октавных полос, 1/с; δ_N – коэффициент звукопоглощения внутри производственного помещения, 1/с.

Для двигателей выполняется соотношение:

$$Q = S'_g V_{gi} \quad (2)$$

где S'_g – площадь поверхности двигателя, м²; V_{gi} – октавные скорости колебаний корпуса, м/с.

Октавные уровни виброскорости L_V , измеренные на корпусе двигателя, являются исходными данными для расчёта производительности источника Q_0 . Эти величины зависят от конструктивных особенностей двигателя, его технического состояния, режима работы и жёсткости крепления. Виброскорость значительно изменяется в пределах одной модели при разных условиях эксплуатации, поэтому для достоверного прогноза акустической обстановки рекомендуется использовать результаты непосредственных измерений, а не паспортные данные или обобщённые справочные значения. На практике намного удобнее измерять октавные уровни виброскорости, которые определяются как:

$$L_V = 20 \lg \frac{V_i}{5 \cdot 10^{-8}},$$

тогда выражение (1) производительности Q_0 примет вид:

$$Q = S'_g \cdot 5 \cdot 10^{-8} \cdot 10^{0,05 L_{Vi}}$$

Если на участках одновременно обрабатываются несколько двигателей, то выражение принимает вид:

$$L_{P\Sigma} = 10 \lg \sum_1^k 10^{0,1 L_{Pi}}$$

где k – количество двигателей.

Тогда полученное выражение для суммарного уровня звукового давления $L_{P\Sigma}$ в машинном зале учитывает не только характеристики источников шума, но и акустические свойства помещения, поэтому получена следующая зависимость:

$$L_{P\Sigma} = 2 \lg \frac{S_u}{V} + \lg \sum f_i^2 \left[7,6 \cdot 10^2 \left(f_N \cdot \frac{S_n \alpha_n}{V} \right)^2 + (f_N^2 - f_i^2)^2 \right]^{-1} + 10 \lg \sum_1^{k_2} 10^{0,1 L_{ki}} + 3 \quad (3)$$

Совокупное действие всех источников приводит к тому, что двигатель превращается в мощный широкополосный излучатель. Его шумовое поле включает инфразвуковые составляющие от низкооборотных дизель-генераторов, низкочастотные доминанты от сгорания и выпуска, среднечастотный гул от механизмов и высокочастотные свисты от аэродинамических процессов. Учет всех этих составляющих необходим для точного прогнозирования шумовой обстановки и разработки эффективных мер акустической защиты. Уровень звуковой мощности каждого двигателя определяется по формуле:

$$N = 10 \lg \frac{P^2 S}{2 \rho_0 C_0 10^{-12}} = 20 \lg P + 10 \lg S + 90, \quad \text{дБ} \quad (4)$$

где S_n – площадь производственного помещения, м²; α_n – коэффициент звукопоглощения производственного помещения, параметр, характеризующий суммарное звукопоглощение поверхностей помещения, и зависит от материалов стен, пола, потолка, а также от наличия оборудования и людей.

В практических расчётах часто используют его средние значения для конкретного типа производственного помещения, причем для повышения точности следует проводить измерения времени реверберации. Чем выше звукопоглощение, тем быстрее затухают собственные колебания воздушного объёма, что снижает резонансное усиление шума на определённых частотах и делает акустическую обстановку более равномерной.

Ключевым элементом здесь является расчёт собственных частот f_N , которые определяются геометрией прямоугольного параллелепипеда.

$$f_N = 172 \sqrt{\left(\frac{n_x}{l_x}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{l_y}\right)^2 + \left(\frac{n_z}{l_z}\right)^2}$$

где l_x, l_y, l_z – длина, ширина, высота производственного помещения, м; n_x, n_y, n_z – числовые коэффициенты, определяющие соответствующую собственную частоту колебаний воздушного объема. Для практических целей достаточно рассматривать первые несколько мод колебаний, соответствующих малым значениям n_x, n_y, n_z , так как именно они вносят наибольший вклад в формирование акустического поля на низких и средних частотах – там, где обычно сосредоточена основная энергия шума двигателей. При этом важно отметить, что реальное распределение звукового давления в пространстве помещения не является однородным: вблизи стен и в углах могут образовываться зоны повышенного или пониженного давления в зависимости от совпадения частот возбуждения с собственными частотами объёма. Для каждой октавы количество собственных колебаний определяется согласно таблице.

Таблица

Ширина полосы пропускания для октавных полос

Частота, Гц	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Ширина полосы, Гц	22,4 45	45 90	90 180	180 355	355 710	710 1400	1400 2800	2800 5600	5600 11200

При одновременной работе нескольких двигателей суммарный уровень звукового давления, согласно приведённой формуле, определяется логарифмическим сложением энергий от каждого источника. То есть, если один из двигателей создаёт значительно более высокий уровень шума по сравнению с остальными, именно он будет доминировать, однако даже относительно тихие двигатели могут создавать проблемы, если их шум содержит дискретные составляющие, совпадающие с собственными частотами помещения – в таких случаях возможно локальное увеличение уровня на несколько децибел за счёт резонансных явлений.

Расчётная методика на основе приведённых формул позволяет достаточно точно оценить ожидаемые уровни шума в машинном зале при условии корректного задания всех исходных параметров. Полученное значение L_{pZ} может быть использовано для сравнения с нормативными требованиями и для планирования шумозащитных мероприятий.

Двигатель как источник акустического излучения при обкатке оказывает комплексное воздействие на всё пространство машинного зала. Его шум образуется в результате совокупности термодинамических, механических и аэродинамических процессов. Осознание этого принципа – первый шаг к созданию безопасных и комфортных условий эксплуатации энергетического оборудования. В перспективе развитие методов численного моделирования акустики машинного зала и внедрение адаптивных схем глушения помогут существенно улучшить условия труда на обкаточных участках, не снижая качества технологического контроля.

Список литературы

1. Двигатели внутреннего сгорания: Учеб. для вузов / Хачиян А.С., Морозов К.А., Луканин В.Н. и др.; Под ред. Луканина В.Н. – М.: Высш. шк., 1985. – 311 с.

References

1. Internal Combustion Engines: Textbook for Universities / Khachiyan A.S., Morozov K.A., Lukanin V.N. et al.; Edited by Lukanin V.N. – Moscow: Vysshaya Shkola, 1985. – 311 p.

2. **Пронников, Ю.В.** Теоретическое обоснование выбора звукопоглощающего материала для кабин электроподвижного состава и ограждающих конструкций на участках обкатки двигателей подвижного состава / Ю.В. Пронников, Ю.И. Багиев // Вестник РГУПС. – 2010. - № 4. – С. 20-24.

3. **Чукарин, А.Н.** Теория и методы акустических расчетов и проектирования технологических машин для механической обработки // А.Н. Чукарин. – Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2005. – 152 с

4. **Багиев, Ю.И.** Определение уровней шума, создаваемого при воздействии воздушной составляющей звукозащитных ограждений для участков испытаний ДВС / Ю.И. Багиев, А.Н. Чукарин // Вестник РГУПС. – 2011. - №1. – С. 5-8.

5. **Багиев, Ю.И.** Теоретические исследования колебаний двигателя внутреннего сгорания при его обкатке / Ю.И. Багиев // Транспорт. Безопасность. Логистика: труды междунар. науч.-практ. конф., 27-29 окт. – Ростов н/Д, 2010. – С. 25-31.

6. Экспериментальные исследования шума и вибрации на участках обкатки двигателей внутреннего сгорания и тяговых электродвигателей машиностроительных предприятий / В.Э. Фролов, И.А. Яицков // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2020.– № 3.– С. 271-278.

7. **Яицков, И.А.** Теоретическое исследование воздушной составляющей шума силовых установок транспортных машин // Интернет-журнал «Наукovedение» [Электронный ресурс]. 2017. Т. 9. –№ 6. – URL: <https://naukovedenie.ru/PDF/35TVN617>.

8. **Баланова, М.В.** Методика и техническое обеспечение проведения экспериментальных исследований по определению шума на рабочих местах / М.В. Баланова, Т.А. Финоченко, И.А. Яицков // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. 2019. – № 1. – С. 5-7.

2. **Pronnikov, Yu.V.** Theoretical Justification for the Selection of Sound-Absorbing Material for the Cabins of Electric Rolling Stock and Protective Structures at the Engine Running Sections of Rolling Stock / Yu.V. Pronnikov, Yu.I. Bagiev // Bulletin of RGUPS. – 2010. - No. 4. – P. 20-24.

3. **Chukarin, A.N.** Theory and Methods of Acoustic Calculations and Design of Technological Machines for Mechanical Processing // A.N. Chukarin. – Rostov-on-Don: Publishing Center of DSTU, 2005. – 152 p.

4. **Bagiev, Yu.I.** Determination of noise levels generated by the effect of the air component of soundproof barriers for internal combustion engine test sites / Yu.I. Bagiev, A.N. Chukarin // Bulletin of RSUPS. – 2011. – No.1. – P. 5-8.

5 **Bagiev, Yu.I.** Theoretical studies of internal combustion engine vibrations during its run-in / Yu.I. Bagiev // Transport. Safety. Logistics: proceedings of the international scientific-practical conference, October 27-29. – Rostov-on-Don, 2010. – P. 25-31.

6. Experimental studies of noise and vibration at the running-in sites of internal combustion engines and traction electric motors of mechanical engineering enterprises / V.E. Frolov, I.A. Yaitskov // News of the Tula State University. Technical Sciences. 2020.– No. 3.– P. 271-278.

7. **Yaitskov, I.A.** Theoretical study of the air component of noise of power units of transport machines // Internet journal “Naukovedenie” [Electronic resource]. 2017. Vol. 9. – No. 6. – URL: <https://naukovedenie.ru/PDF/35TVN617>.

8. **Balanova, M.V.** Methodology and technical support for conducting experimental studies to determine noise in the workplace / M.V. Balanova, T.A. Finochenko, I.A. Yaitskov // Proceedings of the Rostov State Transport University. 2019. - No. 1. - P. 5-7.

9. Актуальные проблемы обеспечения охраны труда на производстве / М. Э. Цаболова, А. А. Ташчян, Т. А. Финоченко, И. А. Яицков // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2024. – № 1(66). – С. 100-104.
10. Анализ условий труда работника на предприятиях транспортного машиностроения / М. В. Алексеев, И. А. Смычок, А. Н. Чукарин, Т. А. Финоченко // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2024. – № 3(68). – С. 6-12.

9. Actual problems of ensuring labor protection in production / M.E. Tsabolova, A.A. Tashchiyan, T.A. Finochenko, I.A. Yaitskov // Proceedings of the Rostov State Transport University. - 2024. - No. 1 (66). - P. 100-104.
10. Analysis of working conditions of employees at transport engineering enterprises / M. V. Alekseev, I. A. Smychok, A. N. Chukarin, T. A. Finochenko // Proceedings of the Rostov State Transport University. - 2024. - No. 3 (68). - P. 6-12.

A. S. Pushkin, I. A. Yaitskov

ENGINE AS A SOURCE OF ACOUSTIC RADIATION INTO THE AIR OF A TURBINE ROOM

An engine not only acts as a source of mechanical energy but also as a powerful generator of acoustic radiation. Its operation involves a complex set of physical processes that inevitably generate sound waves that propagate into the room's air. This phenomenon requires detailed consideration, as noise directly impacts the working conditions of personnel, the reliability of equipment, and the acoustic climate of the entire building. Understanding the nature of engine acoustic radiation opens the way to targeted noise management. The first and most effective method is to address the source directly. This involves improving engine design: using more rigid cylinder blocks, optimizing the shape of combustion chambers to reduce the rate of pressure buildup, using damping inserts in pistons and connecting rods, and implementing precision injection systems that minimize detonation.

Keywords: acoustic safety, engine break-in, noise spectrum, industrial environment, internal combustion engine

For citation: Pushkin, A. S. Engine as a Source of Acoustic Radiation into the Air Environment of the Machine Room / A. S. Pushkin, I. A. Yaitskov // Trudy Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobseniya. – 2026. – № 1. – P. 80–85. – DOI 10.46973/1818-5509_2026_1_80.

Сведения об авторах

Пушкин Александр Сергеевич

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Безопасность жизнедеятельности»,
Аспирант,
e-mail: s2006@inbox.ru

Яицков Иван Анатольевич

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС),
факультет «Электромеханический»,
декан, доктор технических наук, профессор,
e-mail: yia@rgups.ru

Information about the authors

Pushkin Alexander Sergeevich

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair «Life Safety»,
Postgraduate student,
email: s2006@inbox.ru

Yaitskov Ivan Anatolievich

Rostov State Transport University (RSTU),
Electromechanical Faculty,
Dean, Doctor of Engineering Sciences,
Professor,
e-mail: yia@rgups.ru