

УДК 621.43.065.001.57

Груданов В.Я., Ткачева Л.Т., Белохвостов Г.И.*УО «Белорусский государственный аграрный технический университет», г. Минск, Беларусь***МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ И АКУСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ГЛУШИТЕЛЕЙ ШУМА ПОРШНЕВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ ТЕОРИИ ЧИСЕЛ**

Аннотация. Показаны основные направления развития теории чисел. Приведена современная классификация рядов предпочтительных чисел, на основе которых разработана математическая модель перфорированной перегородки и дано расчетное обоснование геометрическим и конструктивным параметрам глушителя шума активно-реактивного типа.

Ключевые слова: предпочтительные числа, ряды предпочтительных чисел, золотая пропорция, перфорированная перегородка, глушитель шума, отработавшие газы, двигатель внутреннего сгорания.

Grudanov V.Ya., Tkacheva L.T., Belokhvostov G.I.*Belarusian State Agrarian Technical University, Minsk, Belarus***MODELING AND OPTIMIZATION OF THE HYDRAULIC AND ACOUSTIC CHARACTERISTICS OF MUFFLERS OF NOISE OF PISTON ENGINES BASED ON THE THEORY OF NUMBERS**

Abstract. The main directions of development of number theory are shown. The modern classification of the series of preferred numbers is presented, on the basis of which a mathematical model of a perforated partition has been developed and a computational justification for the geometric and structural parameters of an active-reactive type silencer is given.

Keywords: preferred numbers, rows of preferred numbers, golden ratio, perforated partition, noise silencer, exhaust gases, internal combustion engine.

Введение. Среди глобальных проблем развития современной цивилизации шум относится к числу наиболее важных. Неблагоприятное воздействие шума в той или иной степени ощущает на себе каждый второй человек на планете. Энергетические установки, такие как двигатель внутреннего сгорания (ДВС), являются основными источниками шума в окружающей среде. Уже сейчас, например, передовые страны расходуют на борьбу с шумом транспортных средств около одного процента своего бюджета.

Шум ДВС, с учетом механизмов образования его отдельных составляющих, подразделяют на аэродинамический и структурный. Изначально аэродинамический шум по своему уровню значительно превышает структурный [1]. Проблема снижения этого шума решается с помощью применения эффективных глушителей. Глушители шума должны уменьшать уровень шума и не препятствовать функционированию устройства, генерирующего шум. Кроме этого, к глушителям в зависимости от эксплуатационных особенностей предъявляются требования по габаритам, форме, массе, стоимости, использованию конструкционных и поглощающих звук материалов и т.п.

Общие принципы глушения звука выхлопа ДВС. При распространении плоской звуковой волны в канале и отсутствии отражения звуковых волн за глушителем величина снижения шума ΔZ глушителем определяется зависимостью [2]:

$$\Delta Z = 10 \lg(1 + \rho_c / 2SZ_a)^2,$$

где ρ_c – удельное акустическое сопротивление среды в канале;

S – площадь поперечного сечения канала;

Z_a – акустическое сопротивление глушителя, представляющее собой сумму активного R_a и реактивного φ_a сопротивлений, $Z_a = R_a + i\varphi_a$.

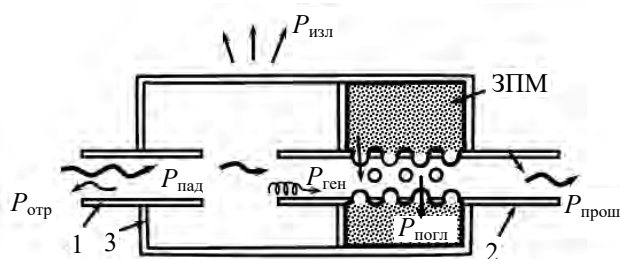
Эффективность глушителя характеризуют эффектом установки глушителя: по звуковому давлению в точке контроля шума $\Delta L = L_1 - L_2$ и по звуковой мощности $\Delta L_p = L_{p1} - L_{p2}$, где L_{p1} и L_{p2} – уровни звуковой мощности в системе за глушителем до и после его установки.

Эффект глушителя по мощности, измеренной при установке не отражающих звук воздуховодов на входе и выходе глушителя:

$$\Delta L_T = 10 \lg(P_{\text{пад}} / P_{\text{прош}}),$$

называют трансмиссионными потерями и чаще всего используют для оценки эффективности конструкции глушителя.

Уровень баланса звуковой энергии (мощности) в глушителе (рисунок 1) имеет вид:



1 – приемная труба глушителя; 2 – выпускная труба; 3 – корпус глушителя шума; ЗПМ – звукопоглощающий материал
Рисунок 1. – Распределение потоков звуковой энергии в глушителе

$$P_{\text{прош}} = P_{\text{пад}} - (P_{\text{отр}} + P_{\text{погл}} + P_{\text{изл}}) + P_{\text{ген}},$$

где $P_{\text{пад}}$, $P_{\text{прош}}$, $P_{\text{отр}}$, $P_{\text{погл}}$, $P_{\text{изл}}$, $P_{\text{ген}}$ – соответственно звуковая энергия падающих, прошедших, отраженных волн, энергия, поглощенная в глушителе, излучаемая в пространство и генерируемая в нем в единицу времени.

В правильно спроектированном глушителе энергией $P_{\text{ген}}$ в приведенном уравнении баланса можно пренебречь. Эффективными средствами уменьшения генерации энергии являются

уменьшение скорости потока в глушителе и придание внутренним элементам глушителя обтекаемой формы.

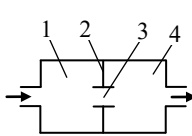
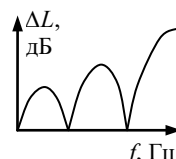
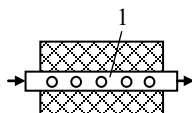
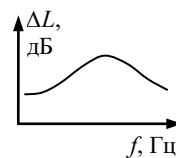
Передача звука через глушитель происходит по газу, находящемуся в полости глушителя, и по элементам конструкции глушителя. Энергия, передаваемая по конструкции, обычно невелика вследствие большой разницы акустических сопротивлений воздуха и металла (материала корпуса глушителя).

По принципу действия глушители делят на две основные группы – отражающие (реактивные, рефлекторные) и диссипативные (активные) глушители. Классификация шумозащитных конструкций представлена в таблице 1 [3].

В отражающих глушителях уменьшение шума за глушителем достигается главным образом за счет отражения энергии набегающих на него волн ($P_{\text{отр}} > P_{\text{погл}}$); в диссипативных – за счет превращения звуковой энергии набегающих волн в тепло в элементах глушителя. Глушители, для которых существенны и отражение и диссипация, называются комбинированными.

В глушителях активного типа звуковая энергия превращается в тепло в звукопоглощающем материале (ЗПМ), который размещают на внутренних полостях глушителя, в воздуховодах и вблизи их выходов в атмосферу. Поток газов в таких глушителях обычно направляется вдоль поверхности поглотителя. Их гидравлическое сопротивление в большинстве случаев невелико.

Таблица 1. – Классификация шумозащитных конструкций

| Физический эффект шумозаглушения | Наименование шумовиброзащитной конструкции | Схема | Обозначение на схеме | Частотные характеристики | Ориентировочная эффективность дБ | Область применения на ПМ и СДМ |
|----------------------------------|--------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------|---------------------------------------------|
| 1. Отражение звука | Глушитель реактивный |  | 1 – первая расширительная камера; 2 – перегородка; 3 – соединительная труба; 4 – вторая расширительная камера |  | 8-10 | Глушение шума выпуска ДВС |
| 2. Поглощение звуковой энергии | Глушитель активный |  | 1 – перфорированная труба |  | 4-10 | Глушение шума всасывания ДВС и компрессоров |

ПМ – путевые машины; СДМ – строительные машины; f – частота звука.

Эффективная работа поглощающих конструкций в широком диапазоне частот обеспечивается при толщинах размещенных на них слоев поглотителя порядка четверти длины волны заглушаемого звука. Для уменьшения уровня низкочастотного шума необходимые размеры поглощающих элементов становятся слишком большими, и более эффективным оказывается применение реактивных глушителей.

Активные глушители целесообразнее всего применять для уменьшения передачи шума на частотах с длиной звуковой волны λ , для которых:

$$0,5\lambda \leq (0,5 \div 1)b_x, \quad b_x = \sqrt{F_b},$$

где b_x – характерный поперечный размер воздуховода;

F_b – его площадь.

Реактивные глушители наиболее эффективны на частотах, для которых $0,5\lambda > b_x$.

Реактивные глушители шума выполняются обычно в виде системы расширительных и резонансных камер, соединенных между собой и с объемом воздуховода с помощью труб и отверстий. Комбинированные (активно-реактивные) глушители выполняются с камерами, изнутри облицованными ЗПМ.

При этом в низкочастотной области камеры работают как отражатели, а в высокочастотной – как поглотители звука.

Характерная особенность глушителей активного типа – довольно плавная кривая частотной характеристики уменьшения шума, а у глушителей реактивных эта кривая имеет ряд острых пиков и провалов.

Глушители шума реактивного типа подразделяются на камерные, резонансные и комбинированные.

Существенным достоинством реактивных глушителей является отсутствие ЗПМ, что особенно важно при использовании в системах с запыленными и химически активными потоками и в системах выброса продуктов сгорания, где применение ЗПМ осложнено его запылением, замасливанием, коксованием продуктов сгорания.

Если в спектре излучаемого шума имеются низкие и высокие частоты, то целесообразно применение комбинированных глушителей. Реактивные и комбинированные

глушители шума komponуют обычно из элементов двух типов – отражающих и соединительных с разграниченными функциями. Первые создают отражение звука, вторые – обеспечивают условия благоприятной работы отражающих элементов и транспортировку рабочей среды между отражающими элементами. Роль отдельных элементов на разных частотах различна в зависимости от специфики их частотных характеристик и характеристик отдельных элементов.

Особенностью реактивных глушителей является резонансный характер их характеристик. При возбуждении реактивного глушителя широкополосным шумом большая часть энергии передается через него вблизи резонансных частот системы за счет возбуждения собственных колебаний газа, соответствующих собственным частотам, близким к частотам входного сигнала. Подавление резонансной передачи звука составляет основу методов повышения эффективности реактивных глушителей шума.

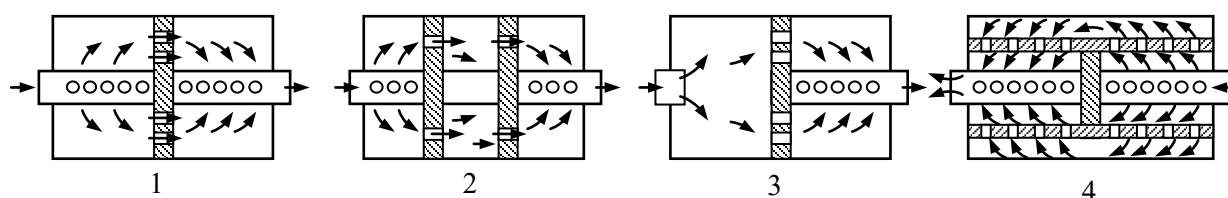
Глушители ДВС изготавливаются из материалов, стойких к коррозии, эрозии и воздействию тепловых нагрузок (не менее 400-500 °С). Корпус, внутренние перегородки и концевые крышки должны быть из стали, толщиной не менее 1,5 мм.

При проектировании глушителей также необходимо учитывать следующее:

- при прочих равных условиях увеличение объема глушителя повышает его эффективность;
- увеличение диаметра глушителя предпочтительнее увеличения его длины;
- производительность глушителя тесно связана с организацией газового потока; более трех резких поворотов потока в глушителе нецелесообразно.

Анализ достоинств и недостатков описанных систем заглушения, а также рассмотрение области их применения позволяют утверждать, что в практике для снижения шума выхлопа ДВС наибольшее распространение нашли двух- и трехкамерные реактивно-расширительные и комбинированные резонансно-расширительные глушители звука и гасители с элементами изменения направления движения газового потока и перфорацией.

Перспективные схемы глушителей шума выхлопа ДВС показаны на рисунке 2.



1, 3 – реактивно-расширительные двухкамерные с перфорацией; 2 – то же, трехкамерный с перфорацией; 4 – то же, многокамерный с увеличенной площадью перфорации

Рисунок 2. – Перспективные схемы глушителей шума выхлопа ДВС

Постановка проблемы. Несмотря на повсеместную эксплуатацию глушителей шума для ДВС различных видов (реактивных, отражательных, резонаторных, диссипативных, особенно диссипативно-реактивного типа) [4], процесс снижения уровня шума выпуска отработавших газов не является совершенным и связан с высокими энергозатратами, вызывающими падение эффективной мощности двигателя.

Кроме того, несмотря на многочисленные исследования, к примеру [5-7], до настоящего времени нет единой научно обоснованной методологической основы для расчета, проектирования и конструирования глушителей шума. При наличии огромного количества конструкций глушителей шума их создание осуществляется бессистемно, по частным эмпирическим инженерным методикам с привлечением большого количества поправочных коэффициентов, не отражающих реальные рабочие процессы, проявляю-

щиеся, например, в диссипации энергии движения газов – процессе рассеивания части механической энергии и превращения ее в теплоту трения. Необходима новая концепция в подходах и принципах конструирования энергосберегающих и высокоэффективных в части шумоглушения, а также компактных и максимально унифицированных глушителей шума, и для ее разработки целесообразно использовать закономерности и свойства теории чисел [8]. При этом достигаются наилучшие массовые, габаритные и энергетические характеристики. Здесь же открываются широкие возможности для унификации, стандартизации узлов и деталей при их высокой компактности и интегрирования вновь создаваемого объекта в мировую систему конструирования новой техники.

Предмет теории чисел. Человечество не может существовать без чисел. Значение чисел невозможно переоценить, причем не только в современном обществе, основанном на цифровых технологиях, но и в доисторические времена системы счисления являются фундаментальной основой цивилизации, на которой базируются такие понятия как счет, упорядочивание, измерение, кодирование, моделирование, оптимизация и мн. др.

Существует несколько определений понятия «теория чисел». Одно из них гласит, что это специальный раздел математики (или высшей арифметики), которая подробно изучает целые числа и объекты, сходные с ними. Другое определение уточняет, что этот раздел математики изучает свойства чисел и их поведение в различных ситуациях. Некоторые ученые считают, что теория настолько обширна, что дать ее точное определение невозможно, а достаточно лишь разделить на несколько менее объемных теорий.

Самыми заметными лицами в разработке теории считаются пифагорейцы Евклид и Диофант, а также жившие в Средние века индийцы Ариабхата, Брахмагупта и Бхаскары. В начале XX века теория чисел привлекла внимание таких математических гениев, как А.Н. Коркин, Е.И. Золотарев, А.А. Марков, Б.Н. Делоне, Д.К. Фадеев, И.М. Виноградов, Г. Вейль, А. Сельберг. Разрабатывая и углубляя выкладки и исследования древних математиков, они вывели теорию на новый, более высокий уровень, охватывающий множество областей.

Наибольший след в развитии теории чисел оставили весьма значительные для этой эпохи работы Леонардо Пизанского и работы Региомонтини (1436-1476), который нашел труды Диофанта и впервые в Европе стал систематически их изучать. Большое влияние на дальнейшее развитие теории чисел оказали и работы А. Лежандра (1752-1833) по теории неопределенных уравнений высших степеней [9].

Однако, основное развитие теория чисел получила в трудах Л. Эйлера (1707-1783), Ферма (1601-1665), Лагранжа (1735-1813), К. Гаусса (1777-1856), Э. Ландау, Г. Бора, Г. Манна, Н.П. Романова, Н.Г. Чудакова, И.М. Виноградова и др.

Дальнейшее развитие теории чисел продолжилось в нынешнюю эпоху благодаря научным трудам Э.М. Сороко, В.Я. Груданова, А.И. Ивануса, Н.Н. Воробьева, Н.А. Васютинского, П.Е. Вайтеховича, Ф. Корбалана и др. С учетом последних достижений современная классификация теории чисел представлена на рисунке 3.

Множество направлений теории чисел находят себе применение на практике, например, в теории телефонных сетей (кабелей), в кристаллографии, при решении некоторых задач теории приближенных вычислений. Однако наибольший интерес представляет геометрическая теория чисел и создание на ее основе системы рядов предпочтительных чисел. Покажем применение геометрической теории чисел конкретно в конструкциях глушителей шума.

Предпочтительные числа. Ряды предпочтительных чисел. Предпочтительные числа – это тщательно и научно подобранные цифровые величины, которыми рекомендуются пользоваться при конструировании вновь создаваемых технических объектов и устройств в соответствии со стандартом ГОСТ 8032-84 (СТ СЭВ 3961-83).

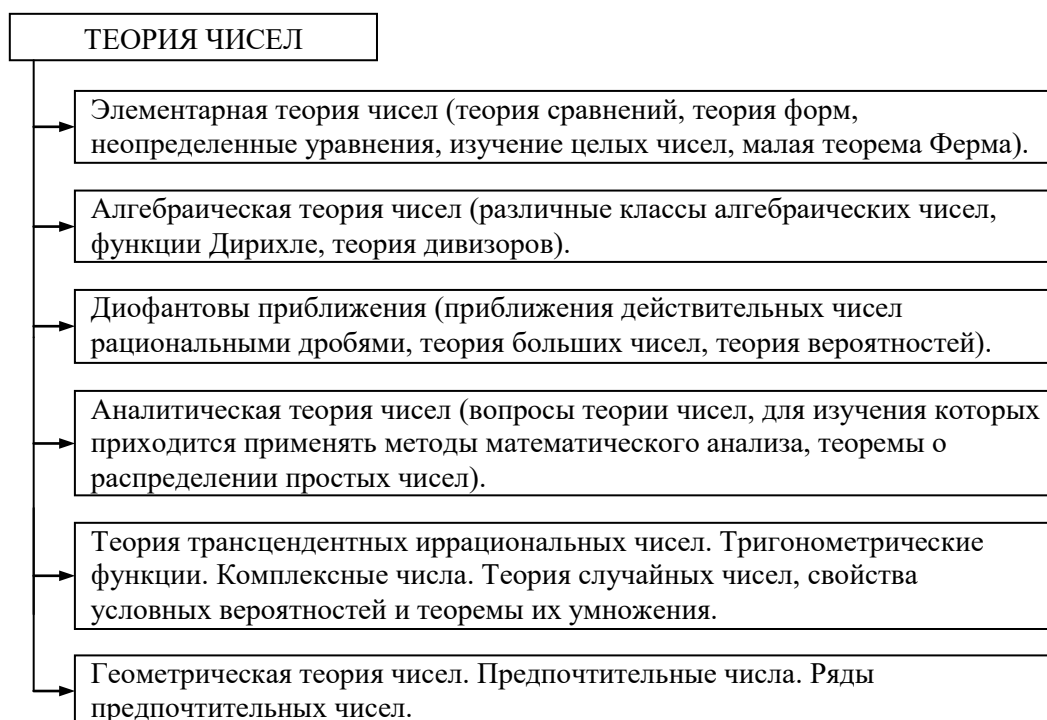


Рисунок 3. – Современные направления в развитии теории чисел

Предпочтительные числа устанавливают взаимосвязь в параметрах деталей и узлов, размеры продукции и сооружений, мощность, грузоподъемность, массовые характеристики, геометрические размеры и т.п. [10].

Известные ряды предпочтительных чисел основаны на принципе геометрической прогрессии. Согласно определению, предпочтительные числа – система параметрических десятичных рядов чисел, построенных по геометрической прогрессии со знаменателем $q_n = \sqrt[n]{10}$, где $n = 5, 10, 20, 40, 80$ – номера рядов, безграничных как в большую, так и в меньшую сторону и обладающих свойствами, которые позволяют применять их при выборе основных и базовых размеров, параметров и характеристик изделий.

В соответствии с ГОСТ 8032-84 ряды предпочтительных чисел подразделяются на основные, дополнительные, выборочные, составные, приближенные, производные и специальные. Однако, определение знаменателей геометрических прогрессий по формуле $q_n = \sqrt[n]{10}$ не имеет достаточно полного научного обоснования. По этой причине некоторые ученые и специалисты считают использование рядов предпочтительных чисел в конструировании технических устройств неправомерным. Однако, если обратиться к научным трудам итальянского математика Леонардо Пизанского (Фибоначчи), можно увидеть, что существует теоретическая взаимосвязь между основными рядами предпочтительных чисел, «золотой» пропорцией и последовательностью Фибоначчи, заключающаяся в том, что значение знаменателей геометрических прогрессий основных рядов можно определить по формуле:

$$q_n = \sqrt[n]{\Phi}$$

где q_n – значение знаменателя геометрической прогрессии n -го основного ряда предпочтительных чисел;

$\Phi = 1,618\dots$ – значение «золотой» пропорции (сечения);

n – целые числа 1, 2, 4, 8 и 16.

При использовании формулы $q_n = \sqrt[n]{\Phi}$ мы получаем новый ряд предпочтительных чисел: 1, 2, 3, 5, 8, 13, 21, 34, 55, 89, 144, 233, 377, 610 и т.д., который совпадает с последовательностью Фибоначчи.

Эта последовательность чисел, описанная итальянским математиком в XIII веке, начинается с двух единиц, а каждое следующее число равно сумме двух предыдущих.

Частное от деления любого числа последовательности на предшествующее ему число будет стремиться к Φ , давая все более точное значение для каждого следующего числа последовательности:

$$\begin{aligned} 1/1 &= 1; 2/1 = 2; 3/2 = 1,5; 5/3 = 1,666\dots; 8/5 = 1,6; 13/8 = 1,625; \\ 21/13 &= 1,615348\dots; 34/21 = 1,61904\dots; 55/34 = 1,61764\dots; \\ 89/55 &= 1,61818\dots; 144/89 = 1,61747\dots; \Phi = 1,6180339887\dots \end{aligned}$$

Для практических расчетов приближенное значение Φ с точностью до пяти десятичных знаков после запятой вполне достаточно, т.е. $\Phi = 1,61803$. Отметим, что $(\Phi)^2 = 2,618$, $\sqrt{\Phi} = 1,272$, $\sqrt[4]{\Phi} = 1,128$ и т.д.

Современная классификация рядов предпочтительных чисел представлена на рисунке 4.

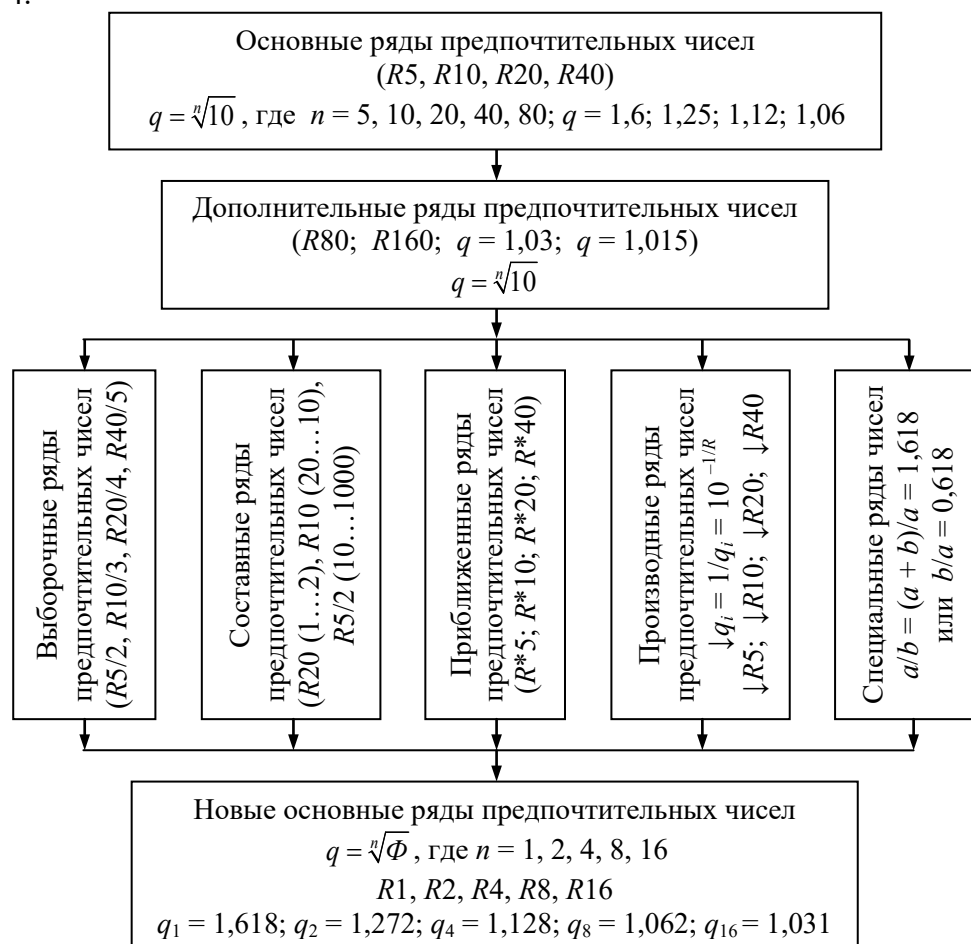


Рисунок 4. – Современная классификация рядов предпочтительных чисел

Из классификации видно, что новые основные ряды предпочтительных чисел практически полностью совпадают с основными рядами предпочтительных чисел по ГОСТ 8032-84, но при этом значение знаменателей геометрических прогрессий является более точным, что и обуславливает достижение технического совершенства нового устройства.

Далее будет рассмотрено, как новые основные ряды предпочтительных чисел можно использовать в построении математической модели перфорированной перегородки и в целом конструкции глушителей шума [11-14].

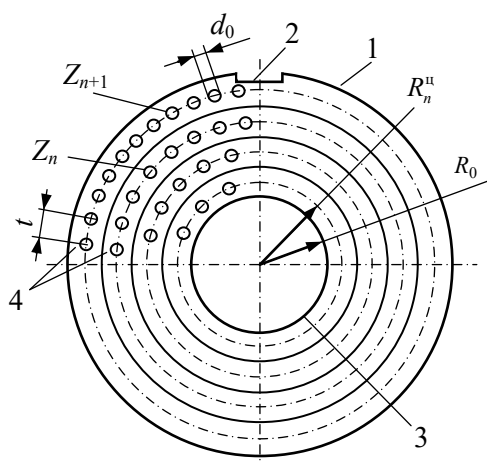
Перфорированная перегородка. Построение математической модели. Перфорированная перегородка является главным рабочим элементом глушителей шума. Основная характеристика перегородки – пропускная способность, которая определяется отношением площади «живого» (проходного) сечения всех отверстий к общей площади перегородки, при этом особое значение имеет характер расположения отверстий:

- по вершинам равносторонних треугольников;
- по вершинам квадратов;
- по концентрическим окружностям и др.

Для построения математической модели с целью оптимизации конструкции принимаем концентрическое расположение отверстий (рисунок 5), при условии, что площадь круга F будем определять не через π , а через Φ по формуле $F = D^2 / \sqrt{\Phi}$, где D – диаметр круга, м.

Для достижения максимальной пропускной способности перегородки и стабилизации потока газов ее рабочую поверхность делим на n -ое количество условных колец.

Отверстия располагаем на центральных радиусах каждого условного кольца, при этом диаметр отверстий и их количество на каждом условном кольце принимаем из ряда чисел Фибоначчи. Например, $d_0 = 3$ мм, а $Z_1 = 13$, $Z_2 = 21$, $Z_3 = 34$ и т.д. Принимаем шаг между отверстиями $t = 1,272 d_0$, тогда:



1 – корпус; 2 – шпоночный паз;
3 – центральное отверстие; 4 – отверстия перфорации; R_0 – радиус центрального отверстия; R_n^n – центральный радиус n -го условного кольца; t – шаг между отверстиями; d_0 – диаметр отверстий
Рисунок 5. – Схема перфорированной перегородки (патент РФ № 2047368)

$$R_n^n = (\sqrt{\Phi})^n \cdot R_0 = (1,272)^n R_0.$$

Количество отверстий перфорации на условных кольцах увеличивается в направлении от центра к периферии и связано между собой соотношением:

$$Z_{n+1} = \left[(1,618)^n \cdot Z_n \right],$$

где $n = 1, 2, 3, 4 \dots$;

Z_{n+1} – количество отверстий перфорации на $n + 1$ условном кольце;

Z_n – количество отверстий перфорации на n -ом условном кольце, а квадратные скобки обозначают целую часть числа.

В результате получаем пропускную способность перегородки равномерную по всей рабочей поверхности и максимально возможную.

При этом наружный диаметр D перегородки определяем из формулы:

$$F_n = D^2 / \sqrt{\Phi},$$

где F_n – общая площадь перегородки, м².

Пример. Рассмотрим перегородку глушителя шума экскаватора ЭО-4321. Принимаем, что для данной перегородки число колец $n = 5$, число отверстий в кольцах со-

ответственно равно 13, 21, 34, 55, 89, радиус жаровой трубы (впускного патрубка) $R_0 = R_{\text{вп}} = 35$ мм, диаметр отверстий $d_0 = 5$ мм ($r_0 = 2,5$ мм) площадь отверстия f_0 . Отверстия располагаются на центральном радиусе $R_{\text{ц}}$ каждого кольца с равномерным шагом t по длине окружности, при этом считаем, что радиус $R_{\text{к}}$ корпуса глушителя равен наружному радиусу пятого кольца R_5 . Тогда найдем пропускную способность каждого кольца:

$$R_1 = 1,272R_0 = 44,52 \text{ мм}; \quad K_{1,13} = \frac{13f_0}{\pi(R_1^2 - R_0^2)} \approx 0,107327;$$

$$R_2 = 1,272R_1 = 56,63 \text{ мм}; \quad K_{2,21} = \frac{21f_0}{\pi(R_2^2 - R_1^2)} \approx 0,107154;$$

$$R_3 = 1,272R_2 = 72,03 \text{ мм}; \quad K_{3,34} = \frac{34f_0}{\pi(R_3^2 - R_2^2)} \approx 0,107372;$$

$$R_4 = 1,272R_3 = 91,62 \text{ мм}; \quad K_{4,55} = \frac{55f_0}{\pi(R_4^2 - R_3^2)} \approx 0,107221;$$

$$R_5 = 1,272R_4 = 116,54 \text{ мм}. \quad K_{5,89} = \frac{89f_0}{\pi(R_5^2 - R_4^2)} \approx 0,107232.$$

Вычислим пропускную способность всей перегородки:

$$K_{0,212} = \frac{212f_0}{\pi(R_5^2 - R_0^2)} \approx 0,107233.$$

Таким образом, $K_{1,13} \approx K_{2,21} \approx K_{3,34} \approx K_{4,55} \approx K_{5,89} \approx K_{0,212}$, равны между собой, что свидетельствует о достижении минимально возможного аэродинамического сопротивления перегородки для принятой конструктивной схемы.

Экспериментальная часть. Для подтверждения разработанной методики были проведены экспериментальные лабораторные исследования. Эксперименты проводились на цилиндрической трубе диаметром 140 мм (был использован корпус глушителя шума автомобиля ГАЗ-52), внутри которой устанавливалась неподвижно перегородка. Через трубу продувался воздух, нагнетаемый вентилятором типа ЦАГИ. При этом были испытаны две пары перегородок с тремя рядами отверстий, расположенных в одном случае обычным традиционным способом, а в другом – по соотношению «золотого» сечения. Общее количество отверстий в парах оставалось неизменным и соответственно составляло 42 и 68. Перегородки были изготовлены из пластмассы, тщательно отшлифованы и плотно закреплялись в середине опытного участка трубы. В ходе опытов микроманометром типа ММН-2400(5)-1,0 измерялась величина статического давления до и после перегородки. Результаты экспериментов приведены в таблице 2, откуда следует, что расположение отверстий в перегородке согласно разработанной методике приводит к весьма существенному уменьшению потери давления: аэродинамическое сопротивление перегородки снижается в среднем на 4,65-6,25 % при скорости движения воздуха 6,6 м/с.

Таким образом, эксперименты подтверждают перспективность использования соотношения «золотой» пропорции в глушителях шума, так как уменьшение аэродинамического сопротивления поперечных перфорированных перегородок обуславливает снижение затрат эффективной мощности дизеля на прокачку газов через конструкцию.

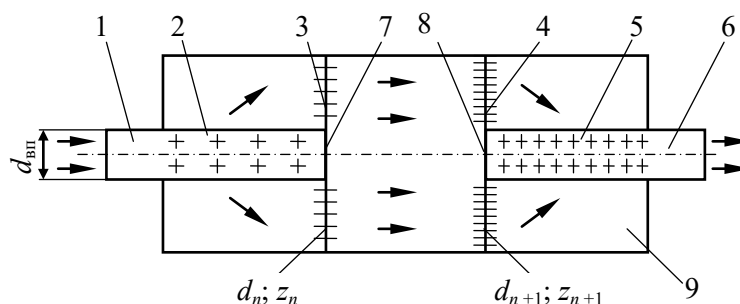
Таблица 2. – Результаты экспериментов

| Перегородка | Число отверстий в рядах | Разность статического давления | Потери давления Δp , Па |
|-------------|-------------------------|--------------------------------|---------------------------------|
| Первая | 10; 15; 17 | 1032 | 48 |
| | 8; 13; 21 | 984 | |
| Вторая | 16; 24; 28 | 576 | 36 |
| | 13; 21; 34 | 540 | |

Число колец – три, скорость движения 6,6 м/с.

Глушители шума. Построение математической модели. Основными рабочими органами глушителя шума являются вертикальные перфорированные перегородки и горизонтальные перфорированные трубы, образующие систему резонансных камер.

По ходу движения потока отработавших газов ДВС диаметр отверстий в трубах и перегородках уменьшается, а их количество увеличивается, что приводит, совместно с резонансными камерами, к снижению скорости и, соответственно, уменьшению уровня шума (звукового давления). На рисунке 6 представлена принципиально-конструктивная схема типового глушителя шума.



1 – впускной патрубков; 2 – входная центральная труба; 3 – входная поперечная перегородка; 4 – выходная поперечная перегородка; 5 – выходная центральная труба; 6 – выпускной патрубков; 7, 8 – заглушки; 9 – корпус глушителя; $d_{вп}$ – диаметр впускного патрубков; d_n – диаметр отверстий перфорации n -го внутреннего элемента; z_n – количество отверстий перфорации в n -ом элементе

Рисунок 6. – Принципиально-конструктивная схема глушителя шума [15]

С целью оптимизации конструкции и достижения технического совершенства данного устройства конструктивные и геометрические параметры всех внутренних элементов глушителя целесообразно взаимосвязать между собой на основе теории чисел и с использованием математической модели перфорированной перегородки. Согласно этой новой модели, расчет глушителя шума осуществляется в следующей последовательности.

1. В качестве определяющего параметра глушителя принят диаметр впускного патрубков, и площадь проходного сечения перфорации входной центральной трубы определяется в зависимости от площади поперечного сечения впускного патрубков $d_{вп}$:

$$F_2 = \sqrt{\Phi} \cdot F_1,$$

где F_1 – площадь поперечного сечения впускного патрубков, m^2 ;

F_2 – площадь проходного сечения перфорации входной центральной трубы, m^2 .

2. Диаметры отверстий перфорации во внутренних элементах глушителя связаны между собой соотношением:

$$d_n = \Phi \cdot d_{n+1},$$

где d_n – диаметр отверстий перфорации n -го внутреннего элемента глушителя, считая от впускного патрубка, м;

n – порядковый номер внутреннего элемента, считая от впускного патрубка.

3. Количество отверстий перфорации во внутренних элементах глушителя связано между собой соотношением:

$$z_n = \frac{z_{n+1}}{\Phi^2},$$

где z_n – количество отверстий перфорации в n -ом внутреннем элементе глушителя, считая от впускного патрубка.

4. Расположение отверстий перфорации на входной 3 и выходной 4 перегородках принимаем концентрическое. Радиусы окружностей, на которых расположены отверстия, определяются по формуле:

$$R_n = (1,272)^n \cdot R_0 \quad \text{или} \quad R_n = (\sqrt{\Phi})^n \cdot R_0,$$

где R_n – радиус n -ой окружности, на которой расположены отверстия, м;

n – порядковый номер окружности, считая от оси глушителя;

R_0 – радиус впускного патрубка, м.

5. Расположение отверстий перфорации на входной 2 и выходной 5 трубах шахматное, с равномерным шагом как в поперечном, так и в продольном направлениях, при этом принимаем:

$$\frac{a}{b} = 1,618 \quad \text{или} \quad \frac{a}{b} = \Phi,$$

где a – шаг перфорации в поперечном направлении;

b – шаг перфорации по длине трубы.

Расчет геометрических параметров глушителя шума по вышеприведенным формулам позволяет получить одинаковые площади проходных сечений всех внутренних элементов по ходу движения газов, значение которых в 1,272 раза больше площади впускного патрубка. При этом существенно упрощается методика расчета, а в конструкции глушителя появляется системная, гармоничная и пропорциональная взаимосвязь внутренних элементов между собой.

Экспериментальная часть. Данная методика была частично реализована в опытном образце глушителя шума, изготовленного и испытанного на Могилевском автомобильном заводе им. С.М. Кирова. Опытный образец был изготовлен на базе серийного глушителя при неизменных габаритных и присоединительных размерах. Испытания проводились в загородной зоне на серийном скрепере МоАЗ-6014 с двигателем ЯМЗ-238 АМ2 при температуре окружающей среды 278 К (5 °С), средней скорости ветра 3,5 м/с и фоновом уровне шума 60 дБ(А). Результаты измерений (средние величины по трем измерениям) представлены в таблице 3.

Обработка результатов испытаний проводилась по методике, изложенной в [16], при этом для оценки технического уровня и оптимизации конструкции глушителей шума использован следующий комплекс относительных и удельных оценочных параметров:

- относительный объем глушителя

$$V_{\text{отн.}} = V_{\text{гл.}}/iV_h,$$

где $V_{\text{гл.}}$ и V_h – объем глушителя и рабочий объем цилиндра двигателя;

i – число цилиндров;

- удельное заглушение на единицу относительного объема [дБ(А)/ед. $V_{отн.}$]

$$\Delta L_{A(V)} = \Delta L_A / V_{отн.};$$

- относительное гидравлическое сопротивление

$$H_{отн.} = H_1 / H_2,$$

где H_1 и H_2 – гидравлическое сопротивление систем с глушителем и без него;

- удельное заглушение на единицу относительного сопротивления [дБ(А)/ед. $H_{отн.}$]

$$\Delta L_{A(H)} = \Delta L_A / H_{отн.};$$

- относительный теплообмен

$$T_{отн.} = T_2 / T_1,$$

где T_1 и T_2 – температуры отработавших газов на выходе, К.

Таблица 3. – Результаты измерений

| Режим испытаний | Число оборотов двигателя, об/мин | Температура отработавших газов на выходе, К (°С) | Гидравлическое сопротивление глушителя, Па | Уровень звукового давления, дБ(А) |
|-----------------------|----------------------------------|--------------------------------------------------|--------------------------------------------|-----------------------------------|
| Без глушителя (труба) | 600 | 608 (335) | 96 | 87 |
| | 2000 | 706 (433) | 640 | 107 |
| Серийный глушитель | 600 | 602 (329) | 480 | 80 |
| | 2000 | 706 (433) | 1520 | 95,5 |
| Новый глушитель | 600 | 596 (323) | 320 | 80 |
| | 2000 | 706 (433) | 1120 | 94,5 |

Уровень звукового давления измерялся согласно ОСТ-23.3.23-88 на расстоянии 0,5 м от выпускного патрубка глушителя шума.

Относительный объем глушителей часто ограничен условиями компоновки и обеспечения обзорности (тракторы, дорожно-строительные машины и др.), что во многом определяет принципы заглушения, реализуемые в конструкции. С учетом этого глушители четырехтактных поршневых двигателей могут быть соответственно малого ($V_{отн.} \leq 2,5$), среднего ($V_{отн.} = 2,5 \dots 3,5$) и большого ($V_{отн.} \geq 3,5$) относительных объемов.

Удельное заглушение на единицу объема характеризует степень использования объема глушителя для обеспечения необходимого заглушения. Наибольший интерес при этом представляет оценка по удельному заглушению в рамках отмеченных ранее пределов относительных объемов, поскольку для многих конструкций глушителей, принадлежавших к одной группе по относительному объему, характерно использование преимущественно одинаковых принципов заглушения. Однако возможна также оценка по этому параметру глушителей, реализующих различные принципы заглушения и принадлежащих к различным группам по относительному объему.

Относительное гидравлическое сопротивление и соответствующее удельное заглушение позволяют, в первом случае, косвенно оценить влияние глушителя на потери мощности и ухудшение топливной экономичности двигателя, во втором – степень использования сопротивления для уменьшения процесса выпуска. Аналогичный смысл имеет оценка конструкции глушителя по относительному теплообмену.

В таблице 4 приведены основные комплексные оценочные параметры испытываемых глушителей шума. Как видно из таблицы 4, новый глушитель шума по всем основным оценочным параметрам имеет более совершенные тепловые, газодинамические

и акустические характеристики, что свидетельствует о его более высоком техническом уровне по сравнению с серийным.

Таблица 4. – Основные комплексные оценочные параметры испытываемых глушителей шума

| Оценочные параметры | Единицы измерений | Глушители | | | |
|--------------------------|------------------------------------------|------------------|-------|---------------|-------|
| | | серийный, об/мин | | новый, об/мин | |
| | | 600 | 2000 | 600 | 2000 |
| $V_{отн.}$ | – | 2,698 | | 2,698 | |
| $\Delta L_{A(V)}$ | дБ(А)/ед. $V_{отн.}$ | 2,595 | 4,262 | 2,595 | 4,633 |
| $H_{отн.}$ | – | 5,0 | 2,375 | 3,333 | 1,75 |
| $\Delta L_{A(H)}$ | дБ(А)/ед. $H_{отн.}$ | 1,4 | 4,842 | 2,1 | 7,143 |
| $T_{отн.}$ | – | 1,018 | 1,0 | 1,037 | 1,0 |
| ΔL_A | дБ(А) | 7,0 | 11,5 | 7,0 | 12,5 |
| $\Delta L_A(H, V_{гл.})$ | дБ(А)/(ед. $H_{отн.}$ · ед. $V_{отн.}$) | 0,519 | 1,795 | 0,778 | 2,647 |
| $\Delta L_A(H, V_{гл.})$ | дБ(А)/(Па · м ³) | 0,365 | 0,189 | 0,547 | 0,279 |
| масса | кг | 19 | | 17 | |

В конструктивном отношении новый (модернизированный) глушитель шума имеет следующие преимущества:

- уменьшение количества внутренних деталей с восьми в серийном до четырех в новом, снижение массы с 19,0 до 17,0 кг и упрощении при этом конструкции;
- производственная технологичность конструкции по размерам и формам поверхности внутренних деталей, сокращение числа технологических операций и их унификация, снижение затрат труда на изготовление и сборку;
- технологическая и конструктивная преемственность, возможность унификации основных деталей глушителей всего семейства машин типа МоАЗ, создание параметрического ряда глушителей.

Вместе с тем необходимо отметить, что в новой конструкции глушителя шума из-за требования по неизменности размеров корпуса серийного глушителя не удалось в полной мере (65 %) практически реализовать принцип «золотой» пропорции.

В целом испытания показали, что расчет параметров перфорации по новой методике, основанной на применении принципа «золотой» пропорции и свойств чисел Фибоначчи, позволяет существенно повысить технический уровень конструкции глушителя в части снижения газодинамического сопротивления при стабильности шумоглушения.

Заключение. Для совершенствования важнейших параметров рабочих органов глушителей шума предложен методологический метод, основанный на использовании теории предпочтительных чисел. Рассмотрено новое направление в развитии теории чисел, составлена ее классификация, включающая в себя геометрическую теорию чисел, предпочтительные числа и ряды предпочтительных чисел, содержащая новый основной ряд предпочтительных чисел с применением последовательности Фибоначчи. Получена новая формула для определения знаменателей геометрических прогрессий рядов предпочтительных чисел. Разработаны конструкции перфорированных перегородок, в которых использованы закономерности новых основных рядов предпочтительных чисел. Дано расчетное обоснование основных геометрических и конструктивных размеров глушителей шума с использованием математической модели перфорированной «золотой» перегородки и новых основных рядов предпочтительных чисел, позволяющее получить конструкцию глушителей шума, обладающую минимально возможным аэродинамиче-

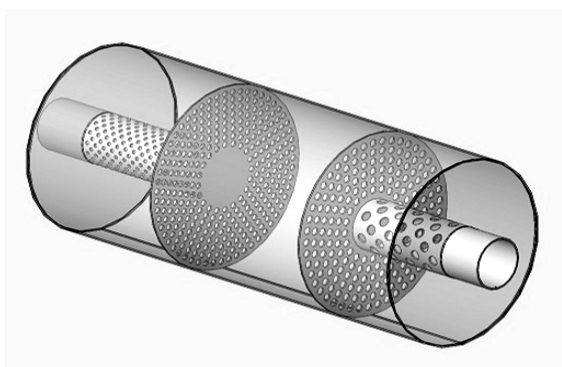


Рисунок 7. – Макет предлагаемой конструкции глушителя шума поршневых ДВС на основе теории чисел

ским сопротивлением при максимально возможном снижении уровня шума выпуска отработавших газов ДВС. Теория предпочтительных чисел применима к любым техническим устройствам [17-20].

Авторами предложена инновационная модель глушителя шума поршневых ДВС с улучшенными гидравлическими и акустическими характеристиками на основе теории чисел [21].

На рисунке 7 представлен макет предлагаемой конструкции глушителя шума поршневых ДВС на основе теории чисел.

Список использованных источников

1. Шатров, М.Г. Шум автомобильных двигателей внутреннего сгорания: учеб. пособие / М.Г. Шатров, А.Л. Яковенко, Т.Ю. Кричевская. – М.: МАДИ, 2014. – 68 с.
2. Терехин, А.С. Снижение аэродинамического шума при помощи комбинированных глушителей / А.С. Терехин, В.И. Яхонтов // Известия высших учебных заведений. Сер. Машиностроение. – 1984. – № 4. – С. 37-40.
3. Иванов, Н.И. Борьба с шумом и вибрациями на путевых и строительных машинах / Н.И. Иванов. – М.: Транспорт, 1978. – 272 с.
4. Шум. Руководство по снижению шума глушителями. Межгосударственный стандарт: ГОСТ 31328-2006 (ИСО 14163:1998). – Введ. 01.04.07. – М.: Межгос. совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 2007 – 66 с.
5. Комкин, А.И. Разработка современных методов расчета и проектирования автомобильных глушителей с требуемыми характеристиками: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 01.04.06 / А.И. Комкин; БалтГТУ «Военмех» им. Д.Ф. Устинова. – Санкт-Петербург, 2012. – 48 с.
6. Лубянченко, А.А. Улучшение виброакустических характеристик глушителей шума выпуска двигателей внутреннего сгорания большой мощности: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 01.04.06 / А.А. Лубянченко; БалтГТУ «Военмех» им. Д.Ф. Устинова. – Санкт-Петербург, 2017. – 22 с.
7. Белоцерковский, С.В. Автомобильные глушители: современные требования, тенденции развития, методы расчета и испытаний / С.В. Белоцерковский, В.Е. Тольский // Электронный журнал «Техническая акустика» [Электронный ресурс]. – 2001. – № 1 (2001) 4.1-4.8. – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/avtomobilnye-glushiteli-sovremennye-trebovaniya-tendentsii-razvitiya-metody-rascheta-i-ispytaniy>. – Дата доступа: 15.07.2020.
8. Груданов, В.Я. Моделирование и оптимизация гидравлических и акустических характеристик глушителей шума поршневых двигателей / В.Я. Груданов, Л.Т. Ткачева // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2017. – № 4 (57). – С. 17-28
9. Бухштаб, А.А. Теория чисел / А.А. Бухштаб. – М.: Просвещение, 1966. – 384 с.
10. Предпочтительные числа и ряды предпочтительных чисел: ГОСТ 8032-84 (СТ СЭВ 3961-83). – Введ. 01.07.85. – М.: Гос. комитет СССР по стандартам, 1987. – 19 с.
11. Воробьев, Н.Н. Числа Фибоначчи / Н.Н. Воробьев. – М.: Наука, 1969. – 216 с.
12. Васютинский, Н.А. «Золотая» пропорция / Н.А. Васютинский. – М.: Молодая гвардия, 1990. – 123 с.

13. Иванус, А.И. Код да Винчи в бизнесе или гармоничный менеджмент по Фибоначчи / А.И. Иванус. – М.: Ленанд, 2005. – 104 с.
14. Фернандо, К. «Золотое» сечение. Математический язык красоты: пер. с англ. / К. Фернандо. – М.: Де Агостини, 2013. – 160 с.
15. Глушитель шума двигателя внутреннего сгорания: пат. РФ 2056508 С1, МПК F01N1/08 / В.Я. Груданов, С.В. Акуленко; заявитель Могилевский технологич. ин-т. – № 93002786/06; заявл. 12.01.93; опубл. 20.03.96 // Открытия. Изобретения. – 1996. – 9 с.
16. Разумовский, М.А. Методика оценки технического уровня глушителей шума выпуска поршневых двигателей / М.А. Разумовский, А.Ф. Безручко, И.М. Мотыль // Двигателестроение. – 1990. – № 3. – С. 37-38.
17. Вайтехович, П.Е. Моделирование и оптимизация технологических процессов и оборудования / П.Е. Вайтехович, В.С. Францкевич. – Минск: БГТУ, 2014. – 268 с.
18. Груданов, В.Я. Основы инженерного творчества / В.Я. Груданов. – Минск: БГУ, 2005. – 299 с.
19. Груданов, В.Я. «Золотая» пропорция в инженерных задачах / В.Я. Груданов. – Могилев: МГУ им. А.А. Кулешова, 2006. – 288 с.
20. Груданов, В.Я. Теория чисел в развитии машиностроительного комплекса Республики Беларусь / В.Я. Груданов, Е.Н. Филидович, Г.И. Белохвостов // Инженер-механик. – 2020. – № 1 (86). – С. 7-9.
21. Инновационная конструкция глушителя шума поршневых двигателей с улучшенными гидравлическими и акустическими характеристиками на основе теории чисел / Каталог ярмарки «Инновации в машиностроении» // Руководитель разработки – Груданов В.Я., Белохвостов Г.И. – Бобруйск: ГУ «БелИСА», 2019. – С. 18-19.

Информация об авторах

Груданов Владимир Яковлевич – доктор технических наук, профессор, УО «Белорусский государственный аграрный технический университет» (пр. Независимости, 99, 220023, г. Минск, Беларусь), e-mail: rektorat@bsatu.by.

Ткачева Людмила Тимофеевна – кандидат технических наук, доцент, УО «Белорусский государственный аграрный технический университет» (пр. Независимости, 99, 220023, г. Минск, Беларусь), e-mail: rektorat@bsatu.by.

Белохвостов Геннадий Иванович – кандидат технических наук, доцент, УО «Белорусский государственный аграрный технический университет» (пр. Независимости, 99, 220023, г. Минск, Беларусь), e-mail: rektorat@bsatu.by.

Information about the authors

Grudanov Vladimir Yakovlevich – D. Sc. (Engineering), Professor, Belarusian State Agrarian Technical University (99, Nezavisimosty Ave., 220023, Minsk, Belarus), e-mail: rektorat@bsatu.by.

Tkacheva Ludmila Timofeevna – Ph. D. (Engineering), Associate Professor, Belarusian State Agrarian Technical University (99, Nezavisimosty Ave., 220023, Minsk, Belarus), e-mail: rektorat@bsatu.by.

Belokhvostov Guennadi Ivanovich – Ph. D. (Engineering), Associate Professor, Belarusian State Agrarian Technical University (99, Nezavisimosty Ave., 220023, Minsk, Belarus), e-mail: rektorat@bsatu.by.

Поступила в редакцию 22.07.2020 г.