

УДК 629.336

DOI: 10.46960/1816-210X_2021_4_100

МЕТОДИКА УЛУЧШЕНИЯ АКУСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК РАБОТЫ РОТОРНО-ВИНТОВЫХ ДВИЖИТЕЛЕЙ ПРИ ДВИЖЕНИИ ПО ЛЬДУ

Д.С. МокеровORCID: 0000-0002-5747-5993 e-mail: mokerov90@bk.ru

Нижегородский государственный педагогический университет им. К. Минина

Нижний Новгород, Россия

Рассматривается влияние конструкции роторно-винтового движителя вездеходных машин на общий уровень шума, генерируемого данной техникой при движении по льду. Приведены экспериментальные зависимости между колебаниями винтовой лопасти и базового цилиндра роторного движителя и величиной шума, возникающего при работе вездеходной техникой. Предложены технические решения в виде уменьшения длины базового цилиндра, увеличения его диаметра и толщины стенки, увеличения угла навивки винтовой лопасти, изменения ее профиля, применения устройства балансировки ротора и заполнения его шумопоглощающим материалом для решения поставленной задачи. Сформулированные критерии оценки допустимого уровня шума, возникающего при работе вездеходной машины. Предложена новая методика выбора рациональных параметров роторно-винтовых движителей, отличительной особенностью которой является наличие блока проверки соответствия шумовых параметров его работы, установленным нормам. Результаты исследования могут быть использованы для снижения уровня акустической загрязненности местности с целью обеспечения комфортных условий жизни населения.

Ключевые слова: шнек, роторно-винтовая машина, винтовая лопасть, базовый цилиндр, уровень шума, окружающая среда.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Мокеров, Д.С. Методика улучшения акустических характеристик работы роторно-винтовых движителей при движении по льду // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2021. №4. С. 100-109.
DOI: 10.46960/1816-210X_2021_4_100

METHODOLOGY FOR IMPROVING THE ACOUSTIC PERFORMANCE OF ROTARY-SCREW PROPELLERS WHEN MOVING ON ICE

D.S. MokerovORCID: 0000-0002-5747-5993 e-mail: mokerov90@bk.ru

Minin Nizhny Novgorod State Pedagogical University

Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. The influence of the design of the rotary-screw propeller of all-terrain vehicles on the overall noise level generated by this technique when driving on ice is considered. Experimental dependences are given between the vibrations of the screw blade and the base cylinder of the rotary propeller and the amount of noise that occurs when working with all-terrain vehicles. Technical solutions are proposed in the form of reducing the length of the base cylinder, increasing its diameter and wall thickness, increasing the winding angle of the screw blade, changing its profile, using a rotor balancing device and filling it with noise-absorbing material to solve the problem. Formulated criteria for assessing the permissible noise level that occurs during the operation of an all-terrain vehicle. A new method of selecting rational parameters of rotary-screw propellers is proposed, a distinctive feature of which is the presence of a block for checking the compliance of noise parameters of its operation with established norms. The results of the study can be used to reduce the level of acoustic pollution of the area in order to ensure comfortable living conditions for the population.

Key words: screw, rotary screw machine, screw blade, base cylinder, noise level, environment.

FOR CITATION: Mokerov D.S. Methodology for improving the acoustic performance of rotary-screw propellers when moving on ice. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2021. №4. С. 100-109.
DOI: 10.46960/1816-210X_2021_4_100

Введение

Развитие транспортно-технологических комплексов, способных работать в условиях бездорожья, в том числе, на Крайнем Севере, обуславливается принятой Стратегии развития Арктической зоны РФ [1]. Для выполнения данной задачи необходима современная внедорожная техника, способная двигаться как по воде, так и по льду и снегу. Одними из таких машин являются транспортные средства, оснащенные роторно-винтовым двигателем [2]. Вместе с тем, повышение качества транспортного обслуживания населения приводит к увеличению количества используемой техники и, соответственно, антропогенного воздействия на окружающую среду и повышению уровня шума как в кабине транспортного средства, так и на прилегающей территории, что является неблагоприятным фактором [3]. Согласно данным Всемирной Организации Здравоохранения [4], в диапазоне звукового воздействия выше 50 dB риск возникновения сердечно-сосудистых заболеваний возрастает в 1,5 раза.

Таким образом, необходимо сделать вывод о том, что для повышения безопасности эксплуатации вездеходной техники имеется насущная необходимость в разработке математической модели взаимодействия роторно-винтового двигателя со льдом, отличающаяся тем, что в качестве выходного параметра принималась не тягово-скоростные, а шумовые характеристики двигателя, работающего в различных условиях эксплуатации, в разработке на ее основе методики выбора таких характеристик роторно-винтового двигателя, которые, с одной стороны, обеспечивали бы заданный уровень генерируемого шума, а с другой стороны – необходимый запас силы тяги.

Результаты проведенных исследований и научно-технические разработки позволяют улучшить показатели шумового воздействия на окружающую среду при движении машин, оснащенных роторно-винтовым двигателем по льду. Расхождение результатов расчетов на математических моделях и экспериментальных данных не превышало 10 %. Разработанные математические модели позволяют на различных стадиях проектирования вездеходных машин оценить достоинства и недостатки вариантов сочетания параметров роторно-винтового двигателя и тем самым сократить объем и время доводочных испытаний, требующих больших материальных, финансовых и трудовых ресурсов.

Анализ разработанности научной проблемы

При этом исследования взаимосвязи между геометрическими и физическими параметрами роторно-винтового двигателя, позволяющей однозначно рассчитать изменение уровня акустического излучения в окружающую среду, до сих пор не проводилось. Отсутствуют экспериментальные данные, позволяющие оценить влияние тех или иных параметров взаимодействия специальных двигателей со льдом на мощность шумового излучения. Все вышеперечисленные особенности существующих методов оценки величины шумового излучения специального роторно-винтового двигателя транспортных и технологических средств не позволяют выявить пути совершенствования требований к конструкции в специфических условиях движения по ледовой поверхности.

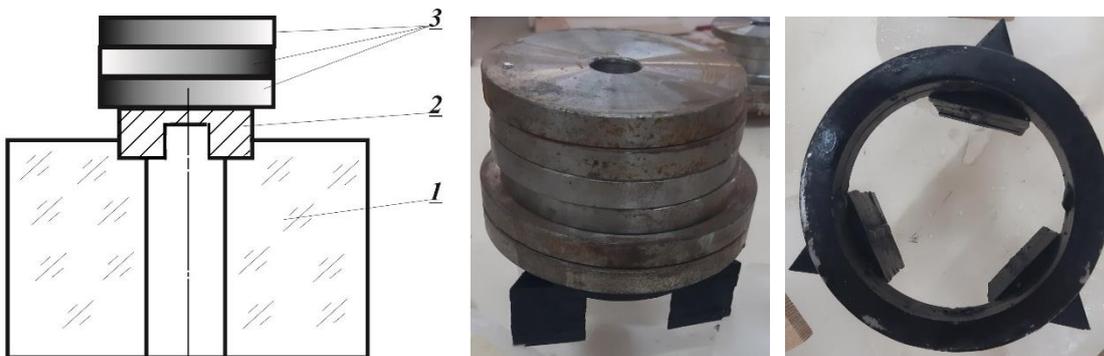
Целью настоящей работы является снижение шума при работе вездеходной машины, оснащенной роторно-винтовым двигателем по льду, в соответствии с чем решались следующие задачи:

- 1) разработать математическую модель генерирования акустического излучения, на основе экспериментально полученных зависимостей и коэффициентов;
- 2) определить вклад источников шума машин, оснащенных роторно-винтовым двигателем в общее звуковое поле, определить степень влияния на указанные показатели параметров работы роторно-винтового двигателя;
- 3) предложить методику выбора рациональных параметров роторно-винтового двигателя, обеспечивающую заданный уровень шума в кабине вездеходного транспортного

- средства, отличающаяся применением модели определения рациональных технико-экономических взаимосвязей между акустическим и тягово-скоростными параметрами движителя;
- 4) получить результаты экспериментальных исследований шума роторно-винтового движителя, включающие определение вклада источников акустической энергии в общее звуковое поле;
 - 5) разработать рекомендации по снижению шума вездеходных машин, оснащенных роторно-винтовым движителем при движении по льду.

Результаты экспериментальных исследований

Экспериментальные исследования проводились с целью определения базовых шумовых характеристик элементов движителя. В задачи первого этапа входило определение эталонных уровней шума при внедрении в лед элементов винтовой лопасти, трения базового цилиндра о лед и изгиба базового цилиндра, позволяющих при помощи известных выражений определять действительный уровень звуковых колебаний, вызываемых воздействием элементов роторно-винтового движителя на лед [6-10]. Эксперименты второго этапа решали задачи проверки и уточнения математической модели формирования звуковых колебаний при движении машины, оснащенной роторно-винтовым движителем по льду.



**Рис. 1. Установка для имитации вдавливания винтовой лопасти в лед:
1 – лед; 2- штамп; 3-грузы**

**Fig. 1. Installation to simulate the indentation of a screw blade into ice:
1 – ice; 2 – stamp; 3 – cargo**

Для проведения стендовых исследований было разработано оригинальное оборудование, показанное на рис. 1 и 2. Натурные испытания проводились на роторно-винтовых машинах и их движителях (рис. 3). При проведении испытаний контроль звука осуществлялся в 9 точках. При использовании одновременно трех шумомеров, каждое испытание проводилось не менее трех раз. Результаты замеров шумов заносились в протокол испытаний, а записанный шум дополнительно обрабатывался с использованием анализатора спектра. Полученные результаты показаны на рис. 4-5.

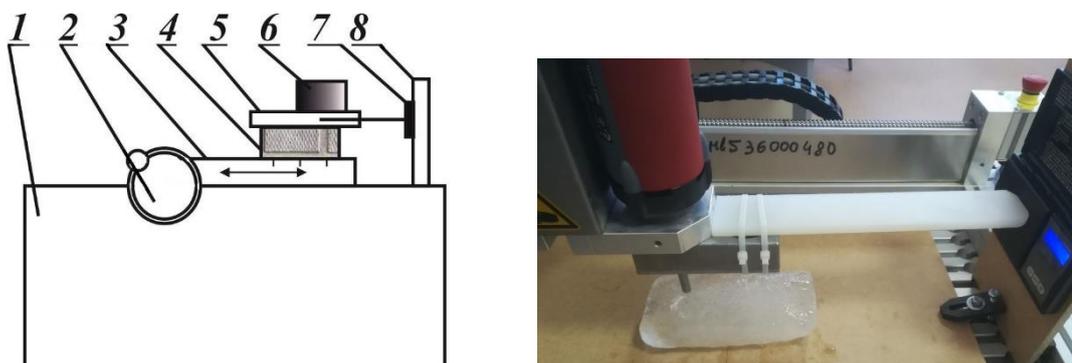


Рис. 2. Установка для определения взаимосвязи между уровнем генерируемого звука и величинами силы трения и деформации базового цилиндра:

- 1 – фрезерный станок; 2 – штурвал управления ручной подачей рабочего стола фрезерного станка;
 3 – рабочий стол фрезерного станка; 4 – жестко закрепленный на рабочем столе образец льда;
 5 – свободно установленный на лед образец испытываемого материала (плоский для трения);
 6 – мерные грузы, установленные на испытываемый образец для изменения силы трения;
 7 – датчик нагрузки, фиксирующий горизонтальную силу, удерживающую испытываемый образец от его перемещения, при движении образца льда, равной силе трения; 8 – неподвижная стойка

Fig. 2. Installation for determining the relationship between the level of generated sound and the values of the friction force and deformation of the base cylinder:

- 1 – milling machine; 2 – steering wheel for manual feeding of the milling machine desktop;
 3 – milling machine desktop; 4 – ice sample rigidly fixed on the desktop; 5 – a sample of the test material freely mounted on ice (flat for friction); 6 – dimensional weights mounted on the test sample to change the friction force; 7 – load sensor that fixes the horizontal force holding the test sample from moving when the ice sample moves equal to the friction force; 8 – fixed rack



Рис. 3. Отдельные элементы движителя, на которых проводились исследования

Fig. 3. Individual elements of the propeller system on which the research was carried out

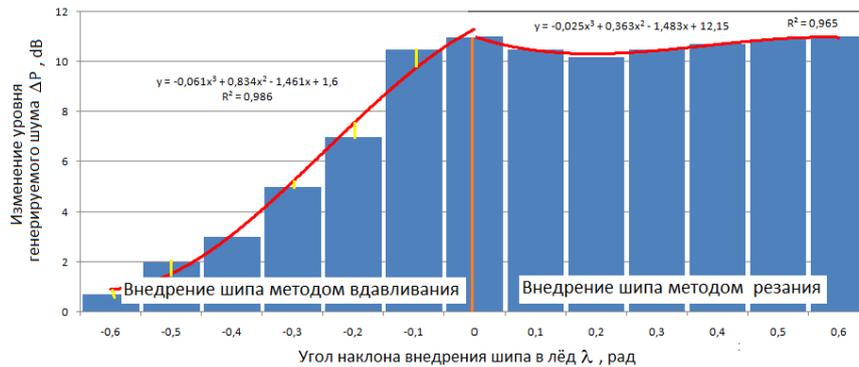


Рис. 4. Значения экспериментальных исследований по генерации звуковых волн при внедрении шипов в лед и результаты их обработки

Fig. 4. The values of experimental studies on the generation of sound waves during the introduction of spikes into the ice and the results of their processing

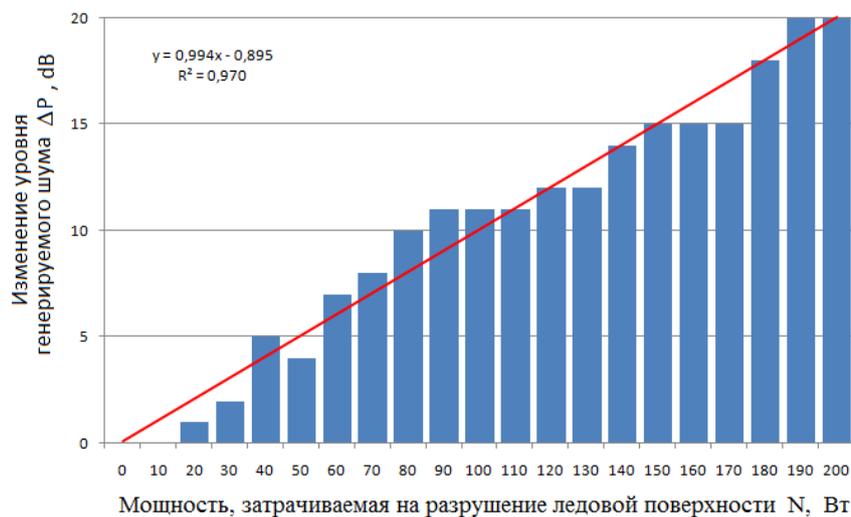


Рис. 5. Сравнение экспериментальных и теоретических значений уровня звукового давления при натуральных испытаниях машин с роторно-винтовым движителем

Fig. 5. Comparison of experimental and theoretical values of the sound pressure level during field tests of machines with rotary-screw propeller

Проверка полученных экспериментальных данных показала, что предложенная математическая модель является адекватной, а результаты экспериментов – воспроизводимыми. Установлено, что относительная погрешность теоретических значений величин не превышает 10-15 % относительно результатов экспериментального исследования.

Аналитическое определение предельных значений уровня шума, генерируемого движителем

При проведении исследований были проанализированы особенности конструкции вездеходных машин, оснащенных роторно-винтовым движителем с целью определения основных источников возникновения шума. На рис. 6 показана стандартная схема формирования звукового поля, генерируемого различными источниками шума, а также ее решение при переменных значениях уровня шума, генерируемого роторно-винтовым движителем (рис. 7).

Полученные данные свидетельствуют о том, что в случае нормирования шума в кабине величиной 85 дВ уровень шума, генерируемого двигателем, не может превышать 100 дВ, уровень шума 80 дВ в кабине не может быть реализован при расположении двигателя внутри кабины, при этом уровень шума, генерируемого двигателем, не должен превышать 95 дВ.

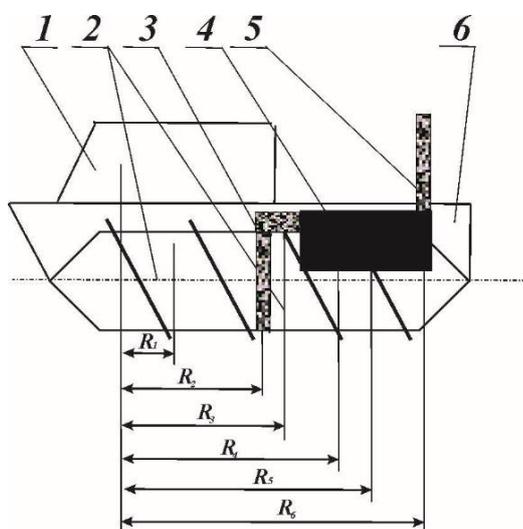


Рис. 6. Схема распространения акустической энергии на вездеходном транспортном средстве, оснащенном роторно-винтовым двигателем:
 1 – кабина; 2 – базовые цилиндры двигателя;
 3 – трансмиссия; 4 – двигатель;
 5 – выпускная система двигателя;
 6 – несущий корпус

Fig. 6. Scheme of acoustic energy propagation on an all-terrain vehicle equipped with a rotary-screw propeller:
 1 – cabin; 2 – basic propeller cylinders;
 3 – transmission; 4 – engine;
 5 – engine exhaust system; 6 – bearing housing

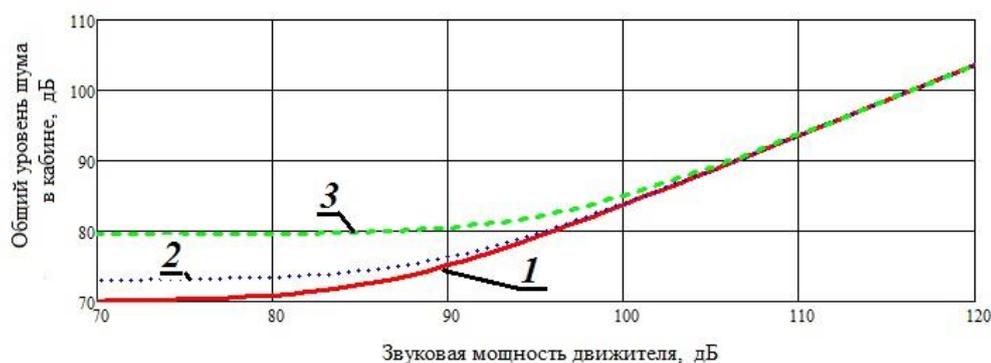


Рис. 7. Влияние уровня звуковой мощности роторно-винтового двигателя на общий уровень шума в кабине вездеходного транспортного средства:

- 1 – для случая расположения двигателя вне кабины и применения механической трансмиссии;
- 2 – для случая расположения двигателя вне кабины и применения гидравлической трансмиссии;
- 3 – для случая расположения двигателя внутри кабины и применения механической трансмиссии

Fig. 7. The effect of the sound power level of a rotary-screw propeller on the overall noise level in the cab of an all-terrain vehicle:

- 1 – for the case of the engine being located outside the cab and the use of a mechanical transmission;
- 2 – for the case of the engine being located outside the cab and the use of a hydraulic transmission;
- 3 – for the case of the engine being located inside the cab and the use of a mechanical transmission

Описание характеристик источников звука было подробно описано в работе [10], где было установлено, что источники звука, возникающие при движения вездеходных машин, имеют стохастический характер. При этом суммарный уровень звука источников определяется энергетическим суммированием (1):

$$L_{\Sigma} = 10 \lg \sum_{i=1}^n 10^{0,1L_i} \tag{1}$$

где L_i – уровень звука у i -ого источника звука, n – общее количество источников звука.

Шум, возникающий при вращении ротора, можно приблизительно оценить по формуле (2):

$$L_P = L_0 + 10 \lg \left[\frac{M}{M_0} \right] + 10 \lg \left[\frac{e}{e_0} \right] + 20 \lg \left[\frac{n}{n_0} \right], \quad (2)$$

а разницу в уровне излучаемой акустической энергии между роторными движителями разных конструкций (3):

$$\Sigma L_P = 10 \lg \left[\frac{X(\omega)}{X_0(\omega)} \right] + 10 \lg \left[\frac{M}{M_0} \right] + 10 \lg \left[\frac{e}{e_0} \right] + 20 \lg \left[\frac{n}{n_0} \right]. \quad (3)$$

Суммарная звуковая мощность, излучаемая при внедрении винтовой лопасти, трении и изгибе роторно-винтового движителя определяется из уравнения (4):

$$L_{\Sigma} = 10 \lg (2 \cdot 10^{0,1\lambda_1 L_1} + n \cdot 10^{0,1\lambda_2 L_2} + 2 \cdot 10^{0,1\lambda_3 L_3}), \quad (4)$$

где L_1 – уровень шума, излучаемый за счет трения базового цилиндра о лед, L_2 – уровень шума, излучаемый за счет резания льда винтовой лопастью, и L_3 – уровень шума, излучаемый за счет деформации базового цилиндра. Все описанные параметры принимаются из результатов экспериментальных исследований, полученных во второй главе, а $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ – экспериментально определяемые коэффициенты передачи механической энергии колебаний в акустическое излучение для силы трения, изгиба и резания. Изменение звуковой мощности, излучаемой при изменении параметров движителя определяется из уравнения (8):

$$\Delta L_P = 10 \lg \left[\frac{m_P}{m_0} \right] + 10 \lg \left[\frac{e}{e_0} \right] + 20 \lg \left[\frac{\omega}{\omega_0} \right] + 10 \lg \left[\frac{X_P V_P S_0}{X_{P0} V_{P0} S} \right] + 30 \lg \left(\frac{V_{l0} S_0}{V_{l0} S} \left[\frac{m_P}{m_0} \right]^{1/3} \right) + 10 \lg \left(\frac{G V_x \sqrt{1 + \text{ctg} \beta}}{G_0 V_{x0} \sqrt{1 + \text{ctg} \beta_0}} \right). \quad (8)$$

m – масса ротора, e – эксцентриситет, ω – частота вращения, X_P – усилие внедрения лопасти в опорное основание, V_P – скорость внедрения, S – площадь ротора, l – расстояние от места приложения силы до передней опоры ротора; G – масса машины V_x – скорость движения машины, β – угол навивки винтовой лопасти. Индекс 0 обозначает параметры базового движителя.

Результаты, полученные при выполнении описанной работы, позволили сделать вывод о том, что рациональный выбор конструктивных параметров роторно-винтового движителя может обеспечить общее снижение уровня шума, генерируемого при движении машины с роторно-винтовым движителем как в окружающей среде, так и в кабину.



Рис. 8. Структура шума, генерируемого роторно-винтовым движителем при движении вездеходной машины по льду:

- 1 – варьирование шума, генерируемого деформацией базового цилиндра;
- 2 – варьирование шума, генерируемого деформацией трением базового цилиндра
- 3 – варьирование шума, генерируемого внедрением винтовой лопасти в лед

Fig. 8. The structure of the noise generated by the rotary-screw propeller when moving an all-terrain vehicle on ice:

- 1 – variation of noise generated by deformation of the base cylinder;
- 2 – variation of noise generated by friction deformation of the base cylinder;
- 3 – variation of the noise generated by the introduction of a screw blade into the ice

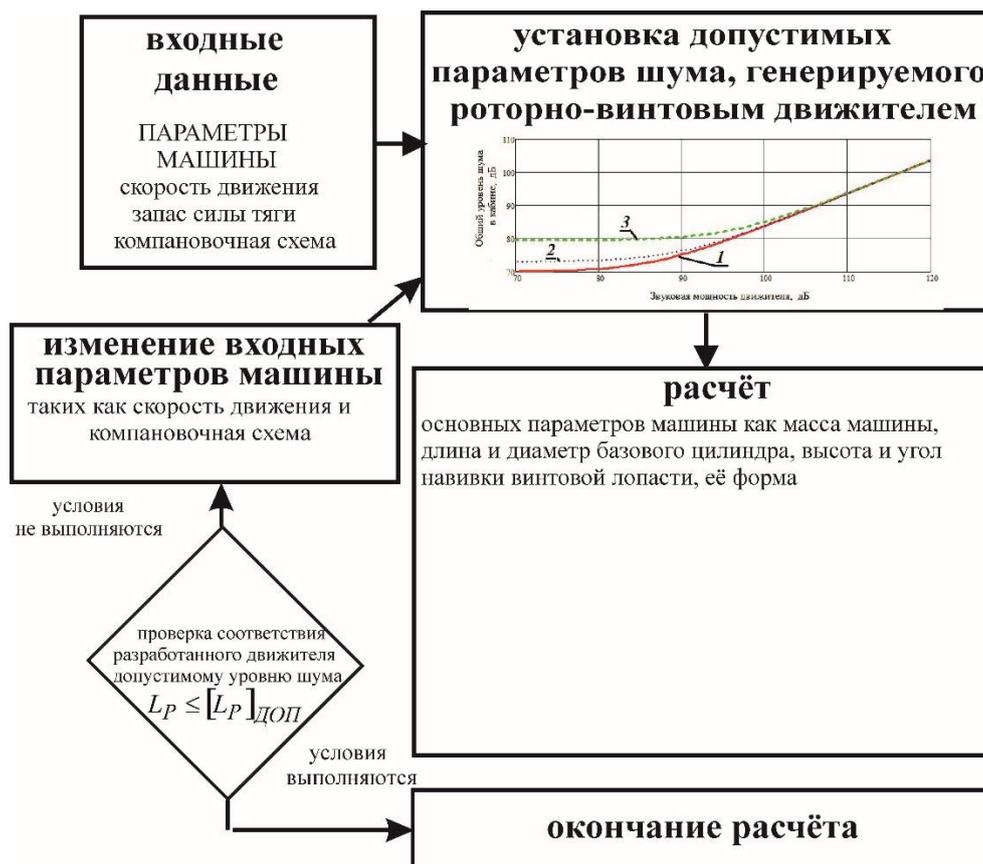


Рис. 9. Методика выбора рациональных конструктивных параметров движителя роторно-винтовой машины, предназначенного для движения по льду

Fig. 9. Method of selection of rational design parameters of the rotor-screw propeller propulsion designed for movement on ice

Методика выбора рациональных параметров движителя

Разработанная математическая модель позволила создать новую методику выбора рациональных параметров роторно-винтового движителя, подробно описанную в [11]. Сделаны выводы о том, что для уменьшения шумности движения машины ее масса должна быть минимальна. Глубина внедрения винтовой лопасти в лед должна обеспечивать заданный уровень тягового усилия, но быть минимальной, как и площадь сечения винтовой лопасти, которая должна обеспечивать прочность конструкции, необходимой для передачи тягового усилия. Для обеспечения малошумности движения машины базовый цилиндр должен быть сбалансированым, заполненным шумоизоляционным материалом, обладать максимально возможным диаметром. Угол навивки винтовой лопасти должен находиться в пределах от 42 до 45°, число витков лопасти на барабане быть равным двум: первый виток с переменной высотой, обеспечивающей одинаковый объем разрушения льда при каждом угле поворота барабана, для уравнивания боковых сил на правом и левом роторах, а второй виток – для обеспечения силы тяги. Длина ротора определяется необходимостью наличия двух витков лопасти, т.е. должна равняться двум диаметрам ротора. Количество навивок на барабане, увеличение тягового усилия должно происходить за счет увеличения количества коротких роторов, а не за счет его удлинения. Толщина стенки базового цилиндра должна обеспечивать отсутствие деформации ротора во время движения.

Выводы

1. Обосновано, что совершенствование конструкции роторно-винтового движителя, производимое с целью снижения шумности его работы, в первую очередь, должно быть направлено на уменьшение величины базового цилиндра ротора как в продольном, так и в поперечном направлении, как процесса, в результате которого генерируется более 50 % акустической энергии. Процесс врезания винтовой лопасти в лед может дать дополнительно 30 % уровня шума. Наименее перспективным является направление, связанное с выбором рациональных материалов движителя, обеспечивающих минимальный уровень звука.

2. Разработана математическая модель колебательного процесса движителя при кинематическом возмущении со стороны опорного основания, отличающаяся тем, что в качестве выходного параметра принималась не величина колебаний, а шумовые характеристики движителя, работающего в различных условиях эксплуатации.

3. Предложена методика выбора рациональных параметров роторно-винтового движителя, обеспечивающая заданный уровень шума, генерируемого движением вездеходного транспортного средства, оснащенного роторно-винтовым движителем по льду, отличающаяся применением модели определения рациональных технико-экономических взаимосвязей между акустическим и тягово-скоростными параметрами движителя.

4. Получены результаты экспериментальных исследований шума, генерируемого роторно-винтовым движителем по льду, включающие определение вклада источников акустической энергии в общее звуковое поле. В ходе проверки было установлено, что относительная погрешность теоретических значений величин не превышает 10-15 % относительно результатов экспериментального исследования.

5. Разработаны рекомендации по снижению шума вездеходных машин, оснащенных роторно-винтовым движителем при движении по льду, защищенные пятью свидетельствами на полезную модель.

Библиографический список

1. Постановление Правительства РФ от 5 декабря 2001 г. № 848 «О федеральной целевой программе «Развитие транспортной системы России (2010-2015 годы)» (с изменениями от 31 мая 2006 г., 9 июля 2007 г., 10 апреля, 20 мая 2008 г., 17 марта 2009 г., 22 апреля, 21, 22 декабря 2010 г., 18 апреля, 3 ноября, 30 декабря 2011г.).
2. **Барахтанов, Л.В.** Снегоходные машины / Л.В. Барахтанов, В.И. Ершов, А.П. Куляшов, С.В. Руквишников. – Горький: Волго-Вятское кн. Изд-во, 1986, 191с.
3. Burden of disease from environmental noise Quantification of healthy life years lost in Europe. - World Health Organization 2011, 131 с.
4. **Mokerov, D.** Sound power spectra modelling of the vehicle in motion equipped with rotary-screw propulsion unit / D. Mokerov, Y.Molev, S. Ivanov, M. Saushkina, Y.Palutin // В сборнике: Journal of Physics: Conference Series. 2019. С. 012034.
5. **Жукова, Е.В.** Шум как гигиеническая и социальная проблема: учебное пособие / Е.В. Жукова, Г.В. Куренкова, М.О. Потапова ; ФГБОУ ВО ИГМУ Минздрава России, Кафедрапрофильных гигиенических дисциплин. – Иркутск: ИГМУ, 2020 – 56 с.
6. **Mokerov, D.** Ways of decreasing noise impact on operator by changing rotary-screw propulsion units natural frequency of vibration/ A. Lipin, Y. Molev, A. Strizhak, V. Khudyakov, D. Mokerov // В сборнике: Journal of Physics: Conference Series. 2019. С. 012040.
7. **Mokerov, D.** Simulation of noise generated by a rotary-screw mover as a result of friction / I. Erasov, I. Kuklina, D. Mokerov, Yu. Molev // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. The International Conference on Innovations and Prospects of Development of Mining Machinery and Electrical Engineering (IPDME 2019). 2019. С. 012002.
8. **Mokerov, D.** Sound generation under rotary-screw propulsion unit base cylinder bending / I.A. Erasov, I.G. Kuklina, Y.I. Molev, D.S. Mokerov, T.G. Skrebneva // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. electronic edition. 2019. С. 012027.

9. **Mokerov, D.** Determining friction coefficient between the base cylinder of rotary screw propulsion unit and various ice types in different daylight surface / I.A. Erasov, Y.I. Molev, T.G. Shetulova, D.S. Mokerov // В сборнике: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. С. 012006.
10. **Mokerov, D.** Case study: regulation of noise produced by a rotary-screw propulsion unit in an all-terrain vehicle / Umar Vahidov , Alexander Belyaev , Vladimir Makarov , Dmitriy Mokerov and Yuri Molev // Proceedings of the 6th International Conference on Vehicle Technology and Intelligent Transport Systems. Volume 1: VENITS, 548-551, 2020
11. **Мокеров, Д.С.** Методика выбора рациональных параметров роторно-винтового движителя, обеспечивающих минимальный уровень шума при движении по льду / У.Ш. Вахидов, И.А. Ерасов, Д.С. Мокеров, Ю.И. Молев // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2020. № 1 (128). С. 113-121.

*Дата поступления
в редакцию: 31.08.2021*