

УДК 629.735.33

Е. В. ЯЛОВЕНКО, В. Н. ЖУРАВЛЁВ*ГП «Ивченко-Прогресс», Запорожье, Украина*

ЗВУКОПОГЛОЩАЮЩАЯ ПАНЕЛЬ ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ НА БАЗЕ ИРРАЦИОНАЛЬНОГО ЧИСЛА ФИБОНАЧЧИ

Предложено решение задачи поглощения шумов, в том числе, для газотурбинных двигателей, методом выделения частотных составляющих шума двигателя, находящихся в иррациональном соотношении, с последующей диссипацией их энергии в элементах конструкции. Экспериментальные исследования показали, что разработанная звукоизоляционная панель, как минимум, на один децибел мощности эффективнее панели ГТД CF-6 в эффективном звуковом диапазоне частот. Конструкция панели и применённые материалы, в частности углепластик, обеспечивают максимальное поглощение энергии частотных составляющих.

Ключевые слова: Газотурбинные двигатели, звукопоглощающая панель, углепластик, число Фибоначчи.

1. Введение. Постановка задачи

Шум самолетов влияет на проживающее вблизи аэропортов население, пассажиров и обслуживающий персонал, создает помехи при приёме и передаче акустической информации, вызывает аномалии в работе приборов и электронной аппаратуры. В связи с этим шумы пассажирских самолетов и вертолетов нормированы стандартами Международной организации гражданской авиации ИКАО, а шумы в салоне – национальными стандартами. Эти требования связаны с актуальностью решения задачи уменьшения авиационного шума и негативного влияния его энергии на окружающую среду, которая связана с деятельностью авиации. Международная ассоциация воздушного транспорта одобрила решение Международной организации гражданской авиации о принятии нового стандарта авиационного шума. В соответствии с этим стандартом, допустимый эффективный уровень шума, излучаемого самолетами новых типов, будет снижен на 7 дБ в сравнении с действующим стандартом. Новый стандарт внедряется с 31 декабря 2017 г. и будет распространяться на самолеты, которые получили сертификат после этой даты.

Традиционно определены два направления борьбы с шумом газотурбинных двигателей (ГТД):

- уменьшение шума в источнике, т.е. в элементах конструкции и узлах ГТД;
- снижение шума в акустическом канале его распространения от источника к приёмнику.

Снижение шума в источнике обычно порождает ухудшение эксплуатационных характеристик

ГТД, поэтому для достижения положительного эффекта часто применяется второй подход. Широко применяются звукопоглощающие конструкции, которые, имея небольшую массу, изолируют источник звуковых колебаний от приемника и имеют хорошие звукопоглощающие характеристики.

В связи с экологической важностью требований к шумам самолетов гражданской авиации, задача создания звукоизоляционных панелей для газотурбинных двигателей и получение с их помощью технического результата, а именно - повышения эффективности звукопоглощения при соответствии их характеристик действующим международным стандартам диапазона звуковых частот, является актуальной [1].

2. Анализ технико-технологических решений традиционных звукопоглощающих панелей

Многослойные конструкции звукопоглощающих панелей с сотовым наполнителем, соты которого представляют собой резонаторы Гельмгольца, настроенные на выбранную частоту излучения элементов конструкции, широко применяются при создании ГТД и самолётов всех классов [2]. На основе конструкций с сотовым наполнителем представляется возможным реализовать их преимущества, такие, как уменьшение массы, увеличение жесткости замкнутых контуров, получить более гладкую аэродинамическую поверхность. С помощью таких конструкций удастся снизить уровень шума в пассажирском салоне и в кабине пилота, а также в отдельных специфических отсеках летательных аппаратов [3].

Рассмотрим достоинства и недостатки наиболее эффективных решений и технико-технологических особенностей известных в настоящее время звукопоглощающих панелей. Известна многослойная панель, которая содержит внешние обшивки, между которыми расположен наполнитель, образованный, по крайней мере, тремя слоями гофрированного листового материала с пилообразным профилем, наложенным один на другой вершинами гофр. При этом центрально расположенный слой выполнен с максимальным шагом между вершинами, а симметрично расположенные относительно него слои выполнены с шагом, который уменьшается по направлению к внешним обшивкам и кратны двум [4]. К недостаткам этого технического решения относится то, что конструкция многослойной панели, при повышенных параметрах прочности и жесткости, имеет значительную толщину и узкую полосу эффективного звукопоглощения, потому что симметрично расположенные слои выполнены с шагом, который уменьшается по направлению к внешним обшивкам. При этом на толщину слоев ограничений не накладывается, что и приводит к увеличению габаритов и массы панели.

Известна звукопоглощающая панель, которая содержит верхнюю, нижнюю обшивку и размещенный между ними зигзагообразный наполнитель. При этом зигзагообразный наполнитель выполнен в виде Z- гофр с зубцами, расположенными под углом 40–50° по направлению звукового потока. В качестве материала обшивки и наполнителя используют композиционный материал, выполненный из фенольного соединительного и тканевого наполнителя, причем содержание фенольного наполнителя в материале для верхней обшивки составляет 5–20 % по массе, а для нижней обшивки – 30–50 % [5]. Недостатком данной звукопоглощающей панели является значительная толщина панели и зависимость звукоизолирующих свойств от размеров панели. К недостаткам этого технического решения относится и то, что при высокой эффективности звукопоглощения в широком диапазоне частот, отмеченная конструкция панели имеет высокую трудоемкость изготовления зигзагообразного наполнителя, выполненного в виде Z- гофров с зубцами, расположенными под определенным углом к направлению звукового потока.

Большое количество экспериментальных исследований и публикаций, посвященных поиску оптимального эффективного решения задачи уменьшения уровня шумов на промышленных объектах, в частности, авиационных газотурбинных двигателях, свидетельствует об отсутствии системного аналитического подхода, позволяющего провести анализ физического процесса диссипации энергии шума технических объектов и машин в элементы конст-

рукции звукопоглощающих панелей.

3. Описание разработанного конструктивно-технологического решения

Звукоизоляционная панель ГТД, которая разработана в ГП «Ивченко-Прогресс» [6], представляет собой конструкцию (рис. 1), содержащую внутреннюю обшивку 1, внешнюю обшивку 2 и размещенный между ними многослойный наполнитель, который, в частности, содержит пять слоёв. Наполнитель является совокупностью чередующихся гофрированных слоев (позиции 3, 4, 5), и разделяющих их промежуточных слоев – позиции 6 и 7. Внутренняя (обращена к источнику звука) обшивка 1 – звукопроницаемая, кольцевая и выполняется из композиционного материала (в частности из стеклопластика). Внешняя обшивка 2 – звуконепроницаемая, кольцевая. Промежуточные слои 6 и 7 – звукоизоляционные, кольцевые и выполняются из композиционного звукопоглощающего материала (в частности из углепластика). Отдельно каждый из гофрированных слоев 3, 4, 5 представляет собой деталь, штампованную из листового материала, который содержит элементы однонаправленных рядов звукоотражающих рефлекторов и соединяет соседние ряды звукоотражающих и звукопоглощающих элементов конструкции.

Звукоотражающие элементы 8 (рефлекторы) представляют собой поверхность, образованную непрерывным параллельным перемещением прямой образующей, которая пересекает кривую второго порядка, аналитически определяемую уравнением параболы. Ряды звукоотражающих элементов в каждом отдельном гофрированном слое 3, 4, 5 параллельны друг к другу. Криволинейные поверхности 9 – цилиндрические, выгнутые относительно парабол звукоотражающих элементов 8. Таким образом, каждый гофрированный слой 3, 4 и 5 представляет собой совокупность параллельных рядов звукоотражающих элементов 8 и соединяющих их криволинейных поверхностей 9, которые образуют циклические ряды.

В соседних рядах звукоотражающих элементов 8 со стороны соединительных криволинейных поверхностей 9 и перпендикулярно им выполнены технологические пазы 10, которые позволяют изготавливать гофрированные слои 3, 4 и 5 звукоизоляционной панели двойной переменной кривизны. Таким образом, существует возможность изготовления, как вогнутых звукоизоляционных панелей, так и выпуклых. При этом геометрические параметры (длина, ширина и шаг) описываемых технологических пазов 10 определяются конструктивными и

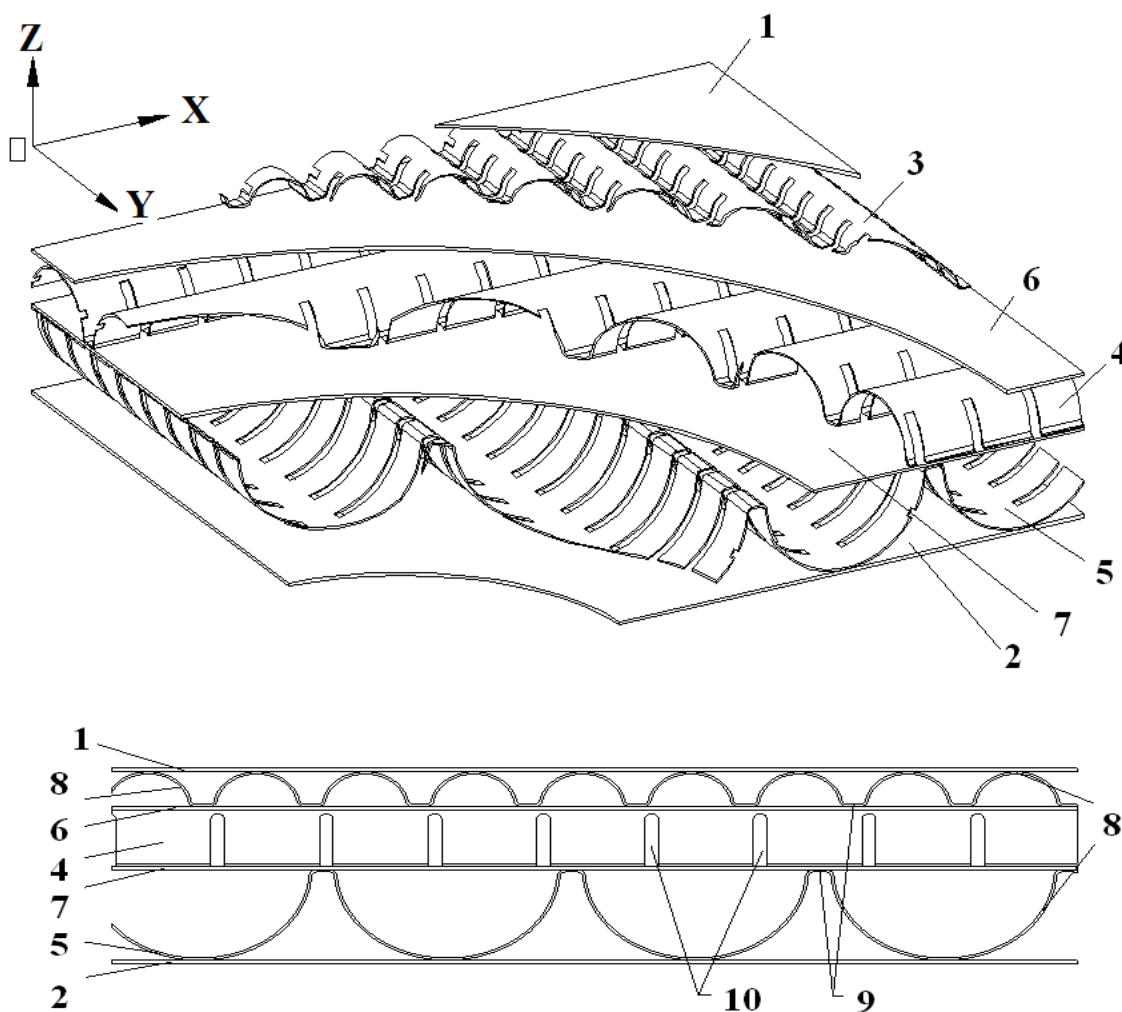


Рис. 1. Конструкция звукопоглощающей панели:

- 1 - внутренняя звукопроницаемая обшивка; 2- внешняя обшивка; 3, 4, 5 - гофрированные слои; 6, 7 - промежуточные слои; 8 - параболические поверхности рядов звукоотражающих элементов; 9 - криволинейные поверхности; 10 - технологические пазы

технологическими параметрами, которые обеспечивают необходимую прочность, жесткость и радиус кривизны всей звукоизоляционной панели. Толщины гофрированных слоев 3, 4 и 5 находятся в соотношении числа Фибоначчи (1,618...).

Внутренняя обшивка 1 звукоизоляционной панели газотурбинного двигателя выполнена из композиционного материала, в частности, из стеклопластика.

Внешняя обшивка 2 изготовлена из материала, который обеспечивает необходимую механическую прочность всей конструкции панели. Пятислойный наполнитель звукоизоляционной панели, а именно гофрированные слои 3, 4 и 5 и разделяющие их промежуточные слои 6 и 7, выполнены из материала с высоким коэффициентом поглощения акустической энергии, в частности, из углепластика.

Использование в составе звукоизоляционной панели ГТД функциональных композиционных ма-

териалов, которые имеют меньшую плотность в сравнении с традиционными материалами, позволяет снизить массу конструкции панели при сохранении её прочности и эксплуатационной надёжности с одновременным повышением звукопоглощающих параметров.

Принцип работы звукоизоляционной панели газотурбинного двигателя заключается в следующем. Энергия, создаваемая источником звука ГТД, попадает на внутреннюю звукопроницаемую обшивку 1 (см. рис. 1) звукоизоляционной панели, частично отражается от нее и рассеивается. При этом основная часть звуковой энергии проникает через внутреннюю звукопроницаемую обшивку 1 в слой наполнителя. Попадая в гофрированный слой 3, звук многократно переотражается и поглощается параболическими поверхностями рядов звукоотражающих элементов 8 (рефлекторов), фокусируясь в отдельные пятна. Пятна фокусировки расположены

на промежуточном слое 6. Их место расположения определяется продольной осью отдельного ряда звукоотражающих элементов 8, которая перпендикулярна вертикальной оси (оси симметрии) рассмотренных параболических поверхностей. При этом часть акустической энергии, которая попала на криволинейные поверхности 9, веерообразно рассеивается в пространстве между внутренней обшивкой 1 и промежуточным слоем 6. Концентрированная в пятно отдельными рядами звукоотражающих элементов 8 энергия звука вызывает вибрацию промежуточного слоя 5 и поглощается им. Эффективное звукопоглощение происходит благодаря композиционному материалу, в частности, углепластику, который имеет высокий коэффициент поглощения акустической энергии.

При последующем рассеянии звук попадает в гофрированный слой 4, который состоит из идентичных, по аналогии с гофрированным слоем 3, рядов звукоотражающих элементов 8. При этом гофрированный слой 4 расположен под углом к гофрированному слою 3, в данном случае, они перпендикулярны друг другу. Такое расположение гофрированных слоев 3 и 4 приводит к дроблению звукового потока для более эффективного звукопоглощения. В гофрированном слое 4 происходят те же звуковые процессы, что и в гофрированном слое 3. Промежуточный слой 7 по выполняемым функциям и конструктивным особенностям аналогичен промежуточному слою 6. В связи с тем, что внешняя обшивка 1 не является звукопоглощающим слоем, а обеспечивает жесткость конструкции всей звукоизоляционной панели, гофрированный слой 5 является крайним, замыкающим, звукопоглощающим слоем.

Собственные частоты вибрирующих гофрированных слоев 3, 4 и 5 формируются конструкцией панели, находятся в отношении, близком к иррациональному, здесь равному числу Фибоначчи. Суперпозиция процессов вибраций слоев будет иметь модулируемую огибающую частоту, которая находится в низкочастотной (слабослышимой) области спектра. Процесс вибрации слоев с этой частотой определяет механический процесс диссипации энергии источника звука в материале панели и реализацию позитивного эффекта – изоляции источника звука от приемника.

Таким образом, эффект звукоизоляции обеспечивается путем суперпозиции процессов внутреннего отражения и поглощения энергии звуковой волны, которая повышает эффективность разработанной звукоизоляционной панели.

4. Анализ результатов экспериментальных исследований

Эффективность технического решения экспериментально определялась расчётом функции коэффициента прозрачности разработанной панели (обратная величина коэффициента затухания) в частотной области. Экспериментальные исследования, проведенные в безэховой камере, показали, что разработанная звукоизоляционная панель ГТД, как минимум, на один децибел мощности (dBm) эффективнее панели классической схемы аналога (прозрачность которого принята за 0 dBm, рис. 2) в эффективном звуковом диапазоне частот, который определяется международными нормативными документами.

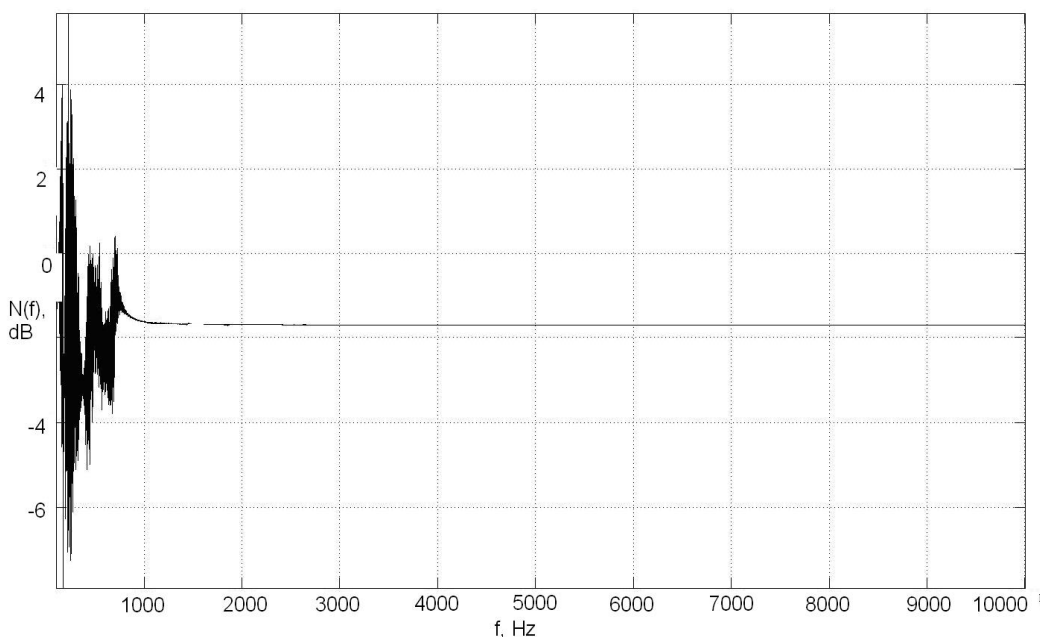


Рис. 2. Результаты анализа параметра прозрачности разработанной звукоизоляционной панели

Анализ функции в низкочастотной области спектра (ниже 300 Гц) позволяет сделать вывод о наличии механических процессов диссипации энергии звука и эффективности предложенных иррациональных отношений размеров конструктивных элементов.

Разработанная звукоизоляционная панель проходит доводочный этап с последующей установкой её на авиационном турбореактивном двухконтурном двигателе Д-18 серии ЗМ. Результаты экспериментальных исследований позволяют предполагать, что разработанные и испытанные в ГП «Ивченко-Прогресс» звукопоглощающие конструкции, за счет высокой эффективности в широком диапазоне частот, позволят самолету с этими двигателями удовлетворять существующим нормам Главы 4 ИКАО.

Выводы

Повышение эффективности звукоизоляционной панели ГТД в стандартном диапазоне частот шума достигается путём рационального подбора параметров геометрической конструкции, материалов и размеров звукопоглощающих слоёв, их взаимного расположения, а также выбора соотношения размеров слоёв.

Литература

1. Приложение 16. К Конвенции о международной гражданской авиации. Охрана окружающей среды. Том 1 Авиационный шум, раздел Авиационная акустика [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://airspot.ru/book/file/594/an16_v1_cons_ru.pdf. – 22.05.2016.
2. Каблов, Е. Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года [Текст] / Е. Н. Каблов // Авиационные материалы и технологии : юбилейный науч.-техн. сб. – М. : ВИАМ, 2012. – С. 7–17.

3. Мунин, А. Г. Авиационная акустика [Текст] : часть 1 / А. Г. Мунин. – М. : Машиностроение, 1986. – 244 с.

4. А. с. 1038260 СССР, МПК 6 В 32 В 3/28 Е 04 2/24. Многослойная панель [Текст] ; заявл. 28.08.1983.

5. Пат. 2307216 Российской Федерации, МПК 7 Е 04 В 1/86, G 10 К 11/16. Звукопоглощающая панель [Текст] ; заявл. 27.09.2007.

6. Пат. 106294 Украины, МПК G01K 11/16, F02B 55/08. Звукоизоляційна панель газотурбінного двигуна [Текст] ; заявл. 25.04.2016.

References

1. Prilozhenie 16. K Konvencii o mezhdunarodnoj grazhdanskoj aviacii. Ohrana okruzhajushhej sredy. Tom 1 Aviacionnyj shum, razdel Aviacionnaja akustika [Annex 16 to the Convention on International Civil Aviation. Environmental protection. Volume 1 Aircraft Noise, acoustic section Aviation]. Available at: http://airspot.ru/book/file/594/an16_v1_cons_ru.pdf. (accessed 22.05.2012).
2. Kablov, E. N. Strategicheskie napravleniya razvitiya materialov i tekhnologii ikh pererabotki na period do 2030 goda [Strategic directions of development of materials and techniques of their processing for the period till 2030]. Aviacionnye materialy i tekhnologii, Moscow, VIAM Publ., 2012, pp. 7–17.
3. Aviacionnaya akustika. – Ch. 1 [Aviation acoustics]. Moscow, Machine industry Publ., 1986. 244 p.
4. Mnogosloinaya panel' [The multilayer panel]. The copyright certificate of the USSR, №1038260, 1983.
5. Zvukopogloshchayushchaya panel' [The sound-proof panel]. Patent RF, № 2307216, 2007.
6. Zvukoizolyatsiina panel' gazoturbinnogo dviguna [The sound-proof panel of the gas-turbine drive]. Patent Ukr, № 106294, 2016.

Поступила в редакцию 1.06.2016, рассмотрена на редколлегии 16.06.2016

Рецензент: д-р техн. наук, профессор, зав. каф. электронных систем Т. В. Критская, Запорожская государственная инженерная академия.

ЗВУКОПОГЛИНАЛЬНА ПАНЕЛЬ ГАЗОТУРБІННОГО ДВИГУНА НА БАЗІ ІРРАЦІОНАЛЬНОГО ЧИСЛА ФІБОНАЧЧІ

Е. В. Яловенко, В. М. Журавльов

Запропоновано рішення задачі поглинання шумів, у тому числі, для газотурбінних двигунів, методом виділення частотних складових шуму двигуна, які знаходяться в ірраціональному співвідношенні з подальшою дисипацією їх енергії в елементах конструкції. Експериментальні дослідження показали, що розроблена звукоізоляційна панель, як мінімум, на один децибел потужності ефективніше панелі ГТД CF-6 в ефективному звуковому діапазоні частот. Конструкція панелі і застосовані матеріали, зокрема вуглепластик, забезпечують максимальне поглинання енергії частотних складових шуму.

Ключові слова: Газотурбінні двигуни, звукопоглинальна панель, вуглепластик, число Фібоначчі.

**SOUND ABSORBING PANEL OF TURBO-ENGINE
ON BASE OF IRRATIONAL FIBONACCI**

E. V. Jalovenko, V. N. Zhuravlev

Solution of task of absorption of noises is offered, including, for turbo-engines, by the method of selection of frequency constituents of noise of engine, that are in irrational correlation with subsequent dissipation of their energy in the elements of construction. Experimental researches have displayed, that the designed sound-proof panel, at least, on one decibel of power panels GTD CF-6 in an effective acoustical frequency range are more effective. The construction of panel and applied materials, in particular black-reinforced plastic, provide maximal absorption of energy of frequency constituents.

Key words: Turbo-engines, sound absorbing panel, black-reinforced plastic, a Fibonacci number.

Яловенко Евгений Витальевич – ведущий конструктор отдела Главного металлурга ГП «Ивченко-Прогресс», Запорожье, Украина, e-mail: Sopitkonatal@yandex.ru.

Журавлёв Владимир Николаевич – д-р техн. наук, зам. нач. Управления информационных технологий ГП «Ивченко-Прогресс», Запорожье, Украина, e-mail: ws50@i.ua.

Jalovenko Evgenie Vitalevich – the leading designer of department of Principal metallurgist SE "Ivchenko-advance", Zaporozhye, Ukraine, e-mail: Sopitkonatal@yandex.ru.

Zhuravlyov Vladimir Nikolaevich – Dr.Sci.Tech., The deputy chief of department of informational techniques SE "Ivchenko-Progress", Zaporozhye, Ukraine, e-mail: ws50@i.ua.