

ISSN 1561-8358 (Print)

ISSN 2524-244X (Online)

УДК 621.43.065.001.57

<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2022-67-3-307-317>

Поступила в редакцию 18.02.2022

Received 18.02.2022

В. Я. Груданов, Л. Т. Ткачева, Г. И. Белохвостов, М. В. Бренч, А. А. Пинчук, В. В. Русских*Белорусский государственный аграрный технический университет, Минск, Беларусь***ВЛИЯНИЕ ПРОЦЕССОВ УТИЛИЗАЦИИ ЭНЕРГИИ ОТРАБОТАВШИХ ГАЗОВ ПОРШНЕВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ НА ГАЗОДИНАМИЧЕСКИЕ И АКУСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГЛУШИТЕЛЕЙ ШУМА**

Аннотация. Представлены научные основы проектирования глушителей шума двигателей внутреннего сгорания (ДВС) с утилизацией теплоты отработавших газов, обеспечивающих выпуск газовых потоков с улучшенными газодинамическими и акустическими характеристиками. Изучен термодинамический анализ процессов утилизации энергии отработавших газов. Термодинамический анализ показал, что утилизация теплоты отработавших газов приводит к повышению термического коэффициента полезного действия (КПД) цикла Отто. Выполнен также эксергетический анализ теплообменных процессов в глушителе и определены пути повышения его термодинамической эффективности. Установлено, что глушитель шума с размещенным внутри теплообменником-змеевиком с позиции второго закона термодинамики, выраженного посредством эксергетического анализа, является более совершенной термодинамической системой по сравнению с обычным глушителем. Дано математическое описание процессов утилизации в условиях внешнего теплового воздействия, при этом выявлен характер влияния теплового воздействия на изменение давления, температуры и плотности. На основе метода Л. А. Вулиса получены аналитические уравнения изменения давления, температуры и плотности. Процессы утилизации энергии отработавших газов способствуют снижению температуры газов, возрастанию плотности, уменьшению скорости потока и падению давления, то есть имеет место эффект (закон Л. А. Вулиса) теплового торможения газового потока, обуславливающего снижение уровня шума при меньшем противодавлении и увеличении КПД двигателя.

Ключевые слова: глушители шума, двигатель внутреннего сгорания, отработавшие газы, утилизационный теплообменник, термодинамический анализ, эксергия, энтропия

Для цитирования: Влияние процессов утилизации энергии отработавших газов поршневых двигателей внутреннего сгорания на газодинамические и акустические характеристики глушителей шума / В. Я. Груданов [и др.] // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2022. – Т. 67, № 3. – С. 307–317. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2022-67-3-307-317>

Vladimir Ya. Grudanov, Ludmila T. Tkacheva, Guennadi I. Belokhvostov, Marina V. Brench, Anna A. Pinchuk, Viktor V. Russkikh*Belarusian State Agrarian Technical University, Minsk, Belarus***THE INFLUENCE OF THE PROCESSES OF UTILIZATION OF EXHAUST GASES OF RECIPROCATING INTERNAL COMBUSTION ENGINES ON THE GAS DYNAMIC AND ACOUSTIC CHARACTERISTICS OF NOISE SILENCERS**

Abstract. The scientific basis for the design of noise suppressors for internal combustion engines with exhaust gas heat recovery, providing the release of gas flows with improved gas-dynamic and acoustic characteristics, is presented. The thermodynamic analysis of the processes of energy utilization of exhaust gases has been studied. Thermodynamic analysis showed that the utilization of exhaust gas heat leads to an increase in the coefficient of performance (COP) of the Otto cycle. An exergy analysis of heat exchange processes in the muffler was also carried out, and ways to increase its thermodynamic efficiency were determined. It has been established that a noise silencer with a heat exchanger-coil installed inside, from the position of the second law of thermodynamics, expressed by means of exergy analysis, is a more advanced thermodynamic system compared to a conventional silencer. A mathematical description of the recycling processes under conditions of external thermal exposure is given, while the nature of the influence of thermal exposure on changes in pressure, temperature and density is established. Based on the method of L. A. Vulis analytical equations for changes in pressure, temperature and density are obtained. Exhaust gas energy recovery processes contribute to a decrease in gas temperature, an increase in density, a decrease in flow velocity and a pressure drop, i.e. there is an effect (law of L. A. Vulis) of thermal stagnation of the gas flow, which causes a decrease in the noise level with less back pressure and an increase in engine efficiency.

Keywords: noise mufflers, internal combustion engine, exhaust gases, recycling heat exchanger, thermodynamic analysis, exergy, entropy

For citation: Grudanov V. Ya., Tkacheva L. T., Belokhvostov G. I., Brench M. V., Pinchuk A. A., Russkikh V. V. The influence of the processes of utilization of exhaust gases of reciprocating internal combustion engines on the gas dynamic and acoustic characteristics of noise silencers. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2022, vol. 67, no. 3, pp. 307–317 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2022-67-3-307-317>

Введение. Как известно, отработавшие газы составляют около 60 % всей эмиссии автотранспортного средства и содержат в своем составе окислы азота NO_x , окись углерода CO , двуокись углерода CO_2 , водяные пары H_2O , частично или полностью несгоревшие углеводороды C_mH_n , окислы серы SO_x , компоненты свинца и другие вещества в зависимости от вида и сорта сжигаемого топлива. При этом выбросы двигателей транспортных средств занимают первое место среди первичных источников загрязнения атмосферы.

Вместе с тем отработавшие газы являются распространенным и достаточно мощным источником вторичных энергоресурсов, с которыми отводится в окружающую среду от 25 до 35 % энергии сжигаемого в двигателе внутреннего сгорания (ДВС) ценного топлива. Применение на энергосиловых установках систем внешней утилизации теплоты отработавших газов сегодня рассматривается как один из основных путей снижения удельного расхода топлива и уменьшения загрязнения окружающей среды токсичными компонентами [1, 2]. При этом еще не созданы научные основы, необходимые для проектирования и изготовления высокоэффективных утилизационных теплообменников.

Поэтому прежде всего необходимо рассмотреть физические особенности и дать математическое описание процессов гидродинамики и теплообмена в охлаждаемых каналах утилизационных теплообменников, оптимизировать конструкцию утилизационного теплообменника по основным теплообменным, гидравлическим и акустическим характеристикам, установить взаимосвязь между основными термодинамическими параметрами газового потока и то влияние, которое они оказывают на эффективность и экологические показатели работы ДВС.

Как известно, применение глушителей в газовыпускном тракте позволяет уменьшить шум на выпуске на 30–40 дБ, однако одновременно повышается сопротивление потоку выхлопных газов – потери эффективной мощности ДВС могут достигать до 3–4 % [1, 2].

В связи с этим перед разработчиками глушителей стоит сложная задача: минимизировать потери, вызванные сопротивлением, обеспечивая при этом требуемое шумоглушение. Несмотря на значительное количество научных исследований в этой области техники [1, 2], в печати дается крайне ограниченная информация о конструктивных особенностях глушителей и путях достижения их оптимальных характеристик (ГОСТ 31 328–2006 (ИСО 14163:1998) «Шум. Руководство по снижению шума глушителями»; пат. РФ 2056508 С1, МПК F01N1/08 «Глушитель шума двигателя внутреннего сгорания», авторы – В. Я. Груданов, С. В. Акуленко; пол. модель к пат. RU 171 331 U1, МПК F01N13/02, F01N1/06 «Реактивный глушитель шума», авторы – С. Г. Смирнов, В. А. Николаева, А. И. Комкин, А. И. Быков; [3–17]). При этом вопросы утилизации энергии отработавших газов большинством исследователей незаслуженно обойдены стороной. Поэтому создание эффективного глушителя с минимальным противодавлением и утилизацией энергии отработавших газов является актуальной задачей.

Таким образом, *цель настоящего исследования* – разработка научных основ проектирования глушителей шума двигателя внутреннего сгорания (ДВС) с утилизацией теплоты отработавших газов, обеспечивающих выпуск газовых потоков с улучшенными газодинамическими и акустическими характеристиками.

Процессы утилизации (отбора) энергии отработавших газов в выпускных трактах ДВС могут осуществляться с помощью утилизационных теплообменников самых разных конструкций: пластинчатых, трубчатых, змеевиковых, «греющих рубашек» и др. (пат. RU 2243388 С2, МПК F01N1/24 «Глушитель шума двигателя внутреннего сгорания», авторы – В. Л. Жданов, Э. Б. Куновский, А. П. Ракомсин, В. В. Корсаков, М. И. Горбачевич; а. с. 1501621 СССР: F 01 5/02 «Глушитель шума двигателя внутреннего сгорания», авторы – В. Я. Груданов, Н. И. Ширин, К. Н. Тупальский, Г. И. Белохвостов; «Транспортный утилизатор тепла отработавших газов», авторы – В. Я. Груданов, А. Н. Рубанов, Л. Т. Ткачева, А. В. Николаев, С. Л. Новодворский; [18–23]).

Данные процессы связаны прежде всего с внешним воздействием на газовый поток $q_{вн}$ ($dq_{вн} < 0$), с диссипацией части механической энергии и превращением ее в теплоту трения ($dq_{тр} > 0$) и с возникновением в газовом потоке вследствие химических экзотермических реакций окисления оксидов азота NO_x внутреннего источника теплоты $q_{хим}$ ($dq_{хим} > 0$).

Для анализа таких процессов воспользуемся основными положениями теории Л. А. Вулиса [3] и будем рассматривать дозвуковой поток с числом Маха $M = 0,3-0,4$ ($M < 1$) и внешним тепловым воздействием $dq_{вн} < 0$, то есть представим, что участок трубопровода ДВС с установленным в нем теплообменником работает в режиме комбинированного сопла и испытывает только тепловое воздействие, при этом техническая работа не совершается, проходное сечение трубы не изменяется по длине и расход газа остается постоянным, при этом будем полагать, что $|dq_{вн}| > (dq_{тр} + dq_{хим})$ или $(dq_{вн} + dq_{тр} + dq_{хим}) < 0$.

Термодинамический анализ процессов утилизации энергии отработавших газов.

Для термодинамического анализа выхлопного тракта ДВС с утилизацией теплоты реальный рабочий необратимый процесс в двигателе целесообразно заменить обратимым замкнутым циклом, совершаемым 1 кг двухатомного идеального газа, при условии, что количество подведенной теплоты в идеальном цикле соответствует теплоте, выделившейся при сгорании реального топлива в смеси с воздухом, а количество отведенной теплоты – теплоте при охлаждении отработавших газов после их выброса в атмосферу. Для утилизации теплоты отработавших газов можно использовать, например, теплообменник-змеевик, заполненный охлаждающей жидкостью (промежуточным теплоносителем) и установленный в полых резонансных камерах глушителя шума системы выпуска двигателя. Схема такой утилизационной системы показана на рис. 1.

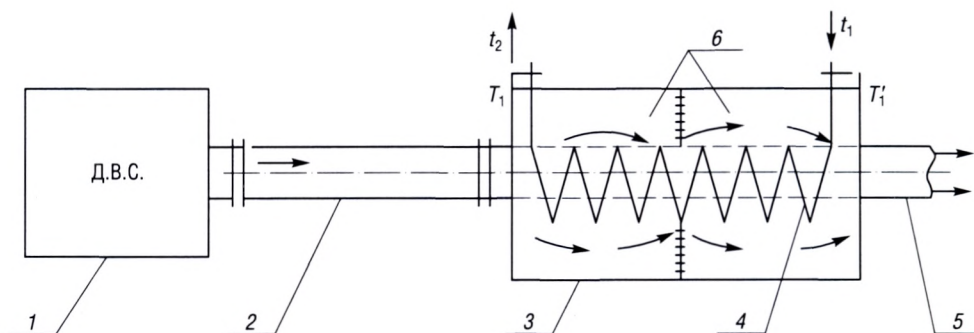


Рис. 1. Схема системы выпуска с утилизацией энергии отработавших газов ДВС в теплообменнике-змеевике с охлаждающей жидкостью: 1 –двигатель, 2 – приемная труба, 3 – глушитель шума, 4 – теплообменник-змеевик с охлаждающей жидкостью, 5 – выхлопная труба, 6 – резонансная камера

Fig. 1. Scheme of the exhaust system with the energy recovery of the exhaust gases of the internal combustion engine in a heat exchanger-coil with a coolant: 1 – engine, 2 – receiving pipe, 3 – noise suppressor, 4 – heat exchanger-coil with cooling liquid, 5 – exhaust pipe, 6 – resonant chamber

На рис. 2 приведена $T-S$ диаграмма заменяющего (идеального) обратимого цикла Отто с утилизацией теплоты отработавших газов.

Процессы 2–3 сгорания топлива и 4–1 выхлопа считаются как изохорные процессы подвода теплоты q_1 и отвода теплоты q_2 , а процесс отвода теплоты с утилизацией его в теплообменнике-змеевике – 4’–1’.

Тогда термический коэффициент полезного действия (КПД) цикла Отто:

1) без утилизации:

$$\eta_{1-2-3-4-1}^{Отто} = 1 - \frac{b + A}{a + b + c}, \tag{1}$$

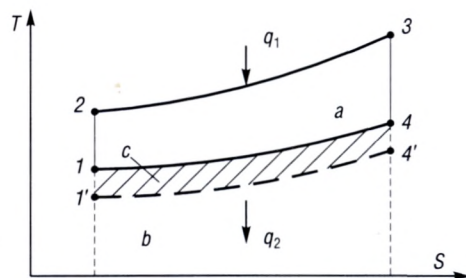


Рис. 2. $T-S$ диаграмма обратимого процесса цикла Отто с утилизацией теплоты отработавших газов

Fig. 2. $T-S$ diagram of the reversible process of the Otto cycle with exhaust gas heat recovery

2) с утилизацией:

$$\eta_{1'-2-3-4'-1'}^{\text{Отто}} = 1 - \frac{b}{a + b + c}, \quad (2)$$

то есть

$$\eta_{1'-2-3-4'-1'}^{\text{Отто}} > \eta_{1-2-3-4-1}^{\text{Отто}}. \quad (3)$$

Однако для решения конкретных инженерных задач важно знать, насколько представляет-ся возможным снизить температуру отработавших газов, каким при этом количеством теплоты можно располагать и достаточно ли ее будет для практической реализации заданного технологического процесса. В связи с этим необходимо рассмотреть эксергию теплоты отработавших газов ДВС с точки зрения возникающих в системе необратимых процессов.

Рассмотрим вопрос работоспособности нашей термодинамической системы, содержащей верхний (температура отработавших газов) T_1 и нижний T_2 источники теплоты и рабочее тело, при помощи которого совершается цикл и с которым подводится тепловой поток q . Если в качестве источника теплоты с температурой T_2 принять окружающую среду T_{cp} как элемент термодинамической системы (случай с обычным глушителем), то работоспособность можно вычислить через эксергию теплоты:

$$E = q \frac{T_1 - T_{\text{cp}}}{T_1}, \quad (4)$$

а ее уменьшение в результате необратимого падения температуры отработавших газов согласно теореме Гуи–Стодолы можно представить как

$$E = E_1 - E_2 = T_{\text{cp}} \cdot \Delta S. \quad (5)$$

Тогда:

1) с утилизацией:

$$E_y = E_1 - E_2 = q \left(\frac{T_1 - T_{\text{cp}}}{T_1} \right) - q \left(\frac{T_1' - T_{\text{cp}}}{T_1'} \right), \quad (6)$$

где T_1 – температура газов в глушителе шума при их охлаждении, К; T_1' – температура промежуточного теплоносителя в теплообменнике-змеевике, К; q – тепловой поток, кДж/кг;

2) без утилизации $E_2 = 0$:

$$E_{6/y} = E_1 = q \left(\frac{T_1 - T_{\text{cp}}}{T_1} \right), \quad (7)$$

где T_1 – температура газов, проходящих по обычному глушителю, К.

Следовательно, с каждого 1 кг сжигаемого топлива в ДВС в случае утилизации энергии отработавших газов мы можем полезно использовать

$$E = E_{6/y} - E_y, \text{ кДж/кг.} \quad (8)$$

Эксергетический анализ теплообменных процессов в глушителе, таким образом, указывает на пути повышения его термодинамической эффективности. Так, применение теплообменника-змеевика в глушителе вызывает снижение температуры отработавших газов, что в свою очередь приводит к снижению потери эксергии по отношению к обычному глушителю. Если мощность двигателя ГАЗ-53 при номинальном числе оборотов коленчатого вала 2600 об/мин составляет по паспортным данным 85 кВт, то, применив установленный в глушителе шума теплообменник-змеевик, дополнительно из отбросной теплоты с отработавшими газами, согласно расчетам, можно полезно использовать 5–10 % энергии сжигаемого топлива. При этом температура отработавших газов снижается всего на 60–80 К.

На рис. 3. представлена диаграмма потоков эксергии теплоты рассмотренной термодинамической системы с утилизацией теплоты отработавших газов, построенная в соответствии с результатами проведенного анализа.

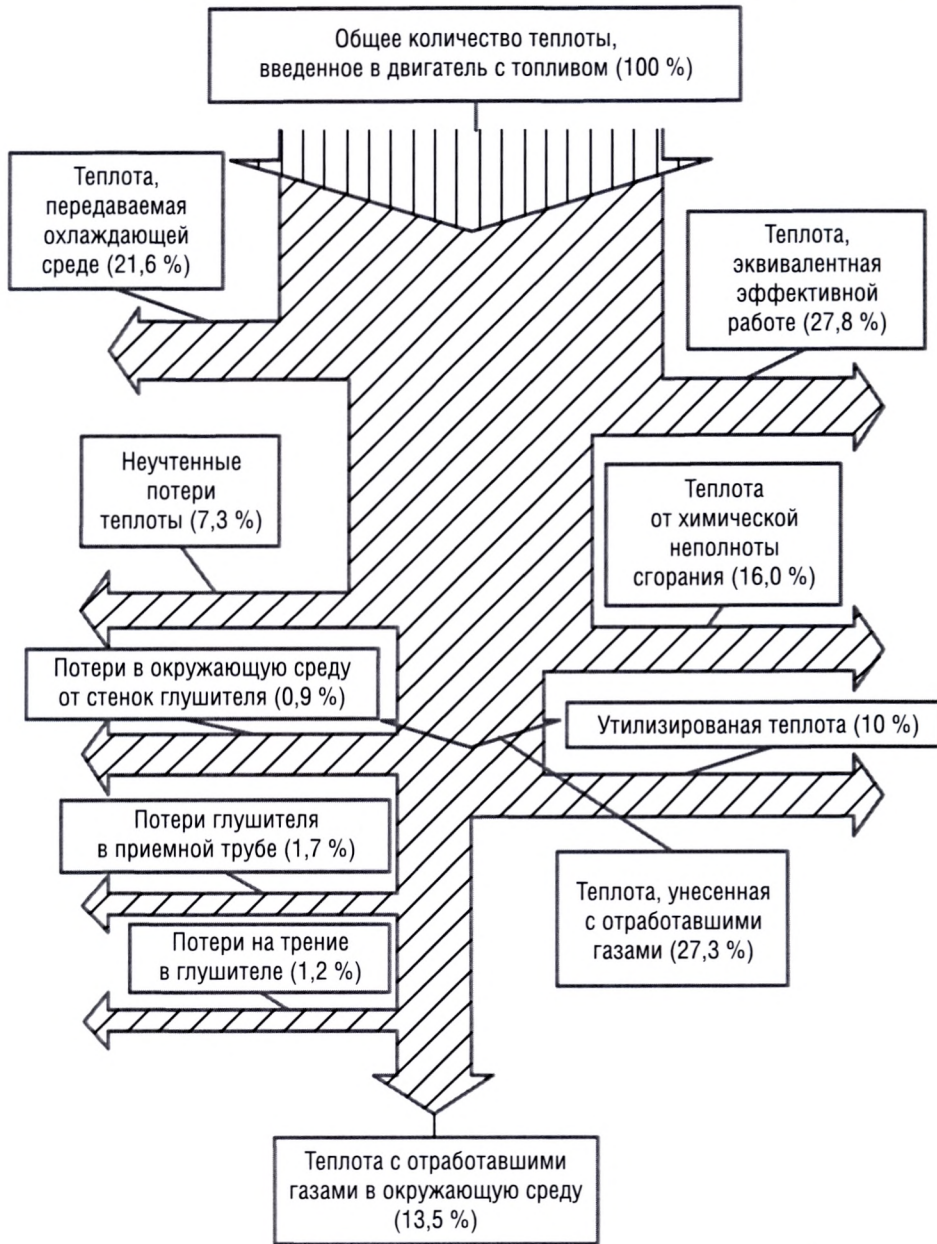


Рис. 3. Диаграмма потоков эксергии теплоты двигателя внутреннего сгорания автомобиля ГАЗ-53

Fig. 3. Diagram of heat exergy flows of the internal combustion engine of the GAZ-53 car

Таким образом, глушитель шума с установленным внутри теплообменником-змеевиком с позиции второго закона термодинамики, выраженного посредством эксергетического анализа, является более совершенной термодинамической системой по сравнению с обычным глушителем.

Математическое описание процессов утилизации в условиях внешнего теплового воздействия. Чтобы отразить физическую сущность рассматриваемых процессов и дать их математическое описание, примем, что работа глушителя шума с утилизацией энергии газов (с установленным внутри теплообменником) аналогична работе комбинированного сопла, в котором одновременно проявляются геометрические, расходные, механические и тепловые воздействия, а также работа сил трения.

Глушитель шума представляет собой трубу переменного сечения ($dF = \text{var}$), через которую проходит газ переменного массового расхода ($dG = \text{var}$), так как двигатель автомобиля постоянно работает в нестационарном режиме. В то же время движение газа по глушителю непостоянного сечения ($dF = \text{var}$) может сопровождаться совершенной механической работой, если установить,

например, турбину в одну из резонансных камер, то есть $dL_{\text{тех}} = \text{var}$. Одновременно в глушителях шума активно-реактивного типа в наибольшей степени проявляется явление диссипации энергии движения газа – процесса рассеивания части механической энергии и превращения ее в теплоту трения $dL_{\text{тр}}$. И, наконец, процесс утилизации энергии газов в глушителях шума характеризуется прежде всего отводом теплоты $dq_{\text{вн}}$, а также теплотой $dq_{\text{хим}}$, выделяемой при химических реакциях окисления окиси азота NO и двуокиси NO₂ и дальнейшей полимеризации NO₂ в четырехокись азота N₂O₄ (при достижении температуры газа ниже 420 К). Причем реакция превращения окиси азота осуществляется с выделением теплоты, то есть $dq_{\text{хим}} > 0$.

Таким образом, общая теплота, подводимая к потоку газа, складывается из отводимой наружу $q_{\text{вн}}$, теплоты трения $q_{\text{тр}}$ и теплоты химических реакций $q_{\text{хим}}$:

$$q = q_{\text{вн}} + q_{\text{тр}} + q_{\text{хим}}, \quad (9)$$

или

$$dq = dq_{\text{вн}} + dq_{\text{тр}} + dq_{\text{хим}}. \quad (10)$$

Тогда уравнение первого закона термодинамики для потока рабочего тела с утилизацией теплоты (охлаждением газа) примет вид:

$$dq = di + WdW + gdh + dL_{\text{тех}} + dL_{\text{тр}}. \quad (11)$$

Полагая, что $dL_{\text{тр}} = dq_{\text{тр}}$ и для горизонтально расположенных глушителей $dh = 0$ (где h – геометрическая высота),

$$dq_{\text{вн}} + dq_{\text{хим}} = di + WdW + dL_{\text{тех}}. \quad (12)$$

Из общего уравнения энтропии имеем

$$dS = \frac{dq}{T}, \quad (13)$$

или

$$dS = \frac{dq_{\text{вн}} + dq_{\text{тр}} + dq_{\text{хим}}}{T}. \quad (14)$$

В то же время из уравнения Лапласа следует

$$\left(\frac{\partial P}{\partial V} \right)_s = -\frac{a^2}{V^2}, \quad (15)$$

где V – удельный объем.

Между тем из уравнения неразрывности

$$dV = V \left(\frac{dF}{F} + \frac{dW}{W} \right), \quad (16)$$

используя выражение

$$dP = \left(\frac{\partial P}{\partial V} \right)_s \left[dV - \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_p \cdot \frac{TdS}{C_p} \right], \quad (17)$$

получаем следующую обобщенную зависимость, удобную для дальнейшего анализа:

$$VdP = -a^2 \left[\frac{dF}{F} + \frac{dW}{W} - \frac{1}{V} \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_p \frac{dq_{\text{вн}} + dq_{\text{тр}} + dq_{\text{хим}}}{C_p} \right]. \quad (18)$$

Далее используем известные уравнения, выражающие также первый закон термодинамики:

$$PdV = d(PV) + WdW + gdh + dL_{\text{тех}} + dL_{\text{тр}}. \quad (19)$$

Так как

$$d(PV) = PdV + VdP, \tag{20}$$

то

$$WdW = -VdP - gdh - dL_{\text{тех}} - dL_{\text{тр}}. \tag{21}$$

Исходя из того, что

$$Ma = \frac{W}{a}, \tag{22}$$

где a – местная скорость звука, подставим значение для VdP в уравнение (21):

$$\begin{aligned} (Ma^2 - 1) \frac{dW}{W} = & \frac{dF}{F} - \frac{1}{VC_p} \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_p dq_{\text{вн}} - \frac{1}{VC_p} \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_p \cdot dq_{\text{тр}} - \frac{1}{VC_p} \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_p dq_{\text{хим}} - \\ & - \frac{1}{a^2} dL_{\text{тр}} - \frac{g}{a^2} dh - \frac{1}{a^2} dL_{\text{тех}}. \end{aligned} \tag{23}$$

Принимая, что $dq_{\text{тр}} = dL_{\text{тр}}$ и $dh = 0$, получаем:

$$(Ma^2 - 1) \frac{dW}{W} = \frac{dF}{F} - \frac{1}{VC_p} \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_p (dq_{\text{вн}} + dq_{\text{хим}}) - \frac{1}{a^2} dL_{\text{тех}} - \left[\frac{1}{VC_p} \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_p + \frac{1}{a^2} \right] dL_{\text{тр}}. \tag{24}$$

Таким образом, мы аналитически получили уравнение, характеризующее изменение скорости газа в глушителе шума с утилизацией энергии с учетом всех вышеперечисленных факторов воздействия.

Рассмотрим полученное соотношение при условии, что $dF = 0$, $dL_{\text{тех}} = 0$, $dL_{\text{тр}} = 0$, но при наличии отвода теплоты (охлаждения газов):

$$(Ma^2 - 1) \frac{dW}{W} = - \frac{1}{VC_p} \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_p (dq_{\text{вн}} + dq_{\text{хим}}). \tag{25}$$

При охлаждении газов $dq_{\text{вн}} < 0$, но одновременно $dq_{\text{хим}} > 0$. Отсюда рассмотрим два случая.

1. Если $(dq_{\text{вн}} + dq_{\text{хим}}) < 0$.

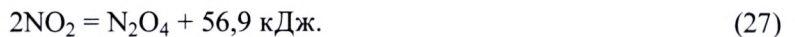
Так как для газов всегда $C_p > 0$, $\left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_p > 0$ и при дозвуковом потоке $Ma < 1$ (двигатели, как правило, работают при $Ma = 0,3 \div 0,4$), то интенсивное охлаждение газов $(dq_{\text{вн}} + dq_{\text{хим}}) < 0$ приводит к торможению потока $dW < 0$, то есть газ в потоке сжимается и его скорость уменьшается.

2. Если $(dq_{\text{вн}} + dq_{\text{хим}}) > 0$.

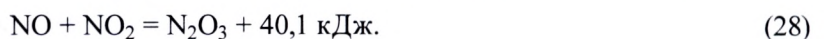
В этом случае имеет место подвод теплоты, что обуславливает ускорение потока $dW > 0$. Отсюда следует вывод, что при $dq_{\text{вн}} = dq_{\text{хим}}$ глушитель шума в данном случае не испытывает теплового воздействия, хотя газы охлаждаются и теплота отводится, но эта теплота эквивалентна теплоте, которая выделяется при химических реакциях окисления окиси азота NO в высшие окислы. При этом отметим, что при соответствующих температурах (ниже 1000 К) оксид азота (II) (окись азота) NO окисляется избыточным кислородом до диоксида азота (двуокиси азота) NO₂ по реакции



При дальнейшем охлаждении (473 К) начинается процесс полимеризации двуокиси азота в тетраоксид диазота (четыреокись азота) N₂O₄:

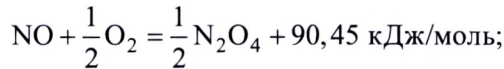


В смеси газов, состоящей из окиси азота NO и двуокиси азота NO₂, одновременно с четырехокисью азота N₂O₄ возможно образование и триоксида диазота (трехокиси азота) N₂O₃:

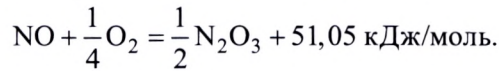


Таким образом, при пересчете на 1 моль оксида азота:

при окислении до N_2O_4 по пути (26), (27) эквивалентное уравнение реакции имеет вид



при окислении до N_2O_3 по пути (26), (28) эквивалентное уравнение реакции имеет вид



Соответственно, реакция окисления только 1 моля оксида азота происходит с выделением до 90,45 кДж теплоты. Значит, для достижения положительного эффекта теплового торможения газа и снижения при этом скорости, а следовательно, и уровня звукового давления необходимо, чтобы

$$dq_{\text{вн}} > dq_{\text{хим}}. \quad (29)$$

Установим также характер влияния теплового воздействия на изменение давления, температуры и плотности. При адиабатическом процессе уравнение состояния газа имеет вид

$$\frac{P}{P_0} = \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^K, \quad (30)$$

где P , ρ – переменные давление и плотность газа соответственно; K – отношение теплоемкости при постоянном давлении к теплоемкости при постоянном объеме; P_0 , ρ_0 – постоянные давление и плотность соответственно [4].

Используя метод Л. А. Вулиса [3], получим следующие уравнения:

изменения давления:

$$\left(Ma^2 - 1 \right) \frac{dP}{P} = K Ma^2 \left(\frac{dG}{G} - \frac{dF}{F} \right) + \frac{1}{a^2} dL_{\text{тех}} + \frac{Ma}{a^2} (K Ma - 1) (dq_{\text{вн}} - dq_{\text{хим}}), \quad (31)$$

при $dG = 0$, $dF = 0$, $dL_{\text{тех}} = 0$ и при $(dq_{\text{вн}} + dq_{\text{хим}}) < 0$, $Ma < 1$ получаем, что $dP < 0$, то есть давление падает;

изменения температуры:

$$\left(Ma^2 - 1 \right) \frac{dT}{T} = (K - 1) Ma^2 \left(\frac{dG}{G} - \frac{dF}{F} + \frac{K + 1}{a^2} dL_{\text{тех}} + \frac{K - 1}{a^2} (K Ma^2 - 1) (dq_{\text{вн}} + dq_{\text{хим}}) \right), \quad (32)$$

при $dG = 0$, $dF = 0$, $dL_{\text{тех}} = 0$, $Ma < 1$ и при $(dq_{\text{вн}} + dq_{\text{хим}}) < 0$ получаем, что $dT < 0$, то есть температура уменьшается;

изменения плотности:

$$\left(Ma^2 - 1 \right) \frac{d\rho}{\rho} = Ma^2 \left(\frac{dG}{G} - \frac{dF}{F} + \frac{1}{a^2} [dL_{\text{тех}} + (K - 1)(dq_{\text{вн}} - dq_{\text{хим}})] \right), \quad (33)$$

здесь при $dG = 0$, $dF = 0$, $dL_{\text{тех}} = 0$, $Ma < 1$ и при $(dq_{\text{вн}} + dq_{\text{хим}}) < 0$ следует, что $d\rho > 0$, то есть плотность газа увеличивается.

В результате получается, что процессы утилизации энергии отработавших газов способствуют снижению температуры T , возрастанию плотности ρ , уменьшению скорости потока W и падению давления P , то есть имеет место эффект теплового торможения.

Снижение давления P и уменьшение скорости W при одновременном увеличении ρ приводит к меньшему противодавлению в системе выпуска двигателя и обуславливает тем самым повышение его КПД. Вместе с тем существенно снижается и уровень шума отработавших газов в системе выпуска.

Заключение. Отработавшие газы ДВС имеют значительные объемы, большие скорости движения газового потока с температурой 150–200 °С и в целом представляют собой достаточно мощный источник вторичных энергоресурсов, при этом отбор энергии от отработавших газов целесообразно осуществлять с помощью специальных утилизационных теплообменников-теплоутилизаторов, совмещенных конструктивно с серийным глушителем шума.

Термодинамический анализ процессов утилизации энергии отработавших газов подтвердил, что глушитель шума с установленным внутри теплообменником-змеевиком с позиции второго закона термодинамики, выраженного посредством эксергетического анализа, является более совершенной термодинамической системой по сравнению с обычным глушителем и имеет более высокий термический коэффициент полезного действия.

Математическое описание процессов утилизации в условиях внешнего теплового воздействия показало снижение температуры T , возрастание плотности ρ , уменьшение скорости потока W и падение давления P , что приводит к меньшему противодавлению в системе выпуска двигателя, повышению его КПД, снижению уровня шума выпуска, так как имеет место эффект теплового торможения потока газов – закон теплового торможения, открытого впервые теплофизиком Л. А. Вулисом в 1950 г. [3].

Получены аналитические уравнения для определения давления, температуры и плотности в условиях внешнего теплового воздействия, выведено уравнение первого закона термодинамики для потока рабочего тела с утилизацией теплоты, из которого следует, что общая теплота, подводимая к потоку газов, складывается из отводимой наружу $q_{\text{вн}}$, теплоты трения $q_{\text{тр}}$ и теплоты химических реакций $q_{\text{хим}}$:

$$q = q_{\text{вн}} + q_{\text{тр}} + q_{\text{хим}} \text{ или } dq = dq_{\text{вн}} + dq_{\text{тр}} + dq_{\text{хим}}. \quad (34)$$

Так как для газов всегда плотность $\rho > 0$, а $\left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_p > 0$ и при дозвуковом потоке $Ma < 1$ (двигатель, как правило, работает при $Ma = 0,3-0,4$), то интенсивное охлаждение газов ($dq_{\text{вн}} + dq_{\text{хим}} < 0$), приводит к торможению потока $dW < 0$, то есть газ в потоке сжимается и его скорость уменьшается.

Утилизованную теплоту отработавших газов можно использовать, например, для обогрева помещений спецавтомобилей «Автомастерская», «Техпомощь», «Электролаборатория», «Автомагазин», нагрева воды, подогрева продуктов питания и т. п.

Список использованных источников

1. Greenhouse gas emissions from heavyduty natural gas, hybrid, and conventional diesel on-road trucks during freight transport / D.C. Quiros [et al.] // *Atmospheric Environment*. – 2017. – Vol. 168. – P. 36–45. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2017.08.066>
2. Trubaev, P.A. Exergic analysis of technological heat devices / P.A. Trubaev, E.A. Zajtsev, P.V. Besedin // *IJPT*. – 2016. – Vol. 8, №4. – P. 24968–24975.
3. Вулис, Л. А. Термодинамика газовых потоков / Л. А. Вулис. – М.; Л.: Госэнергоиздат, 1950. – 304 с.
4. Инзель, Л. И. Основы глушения шума выхлопа двигателей внутреннего сгорания / Л. И. Инзель. – М.: Изд-во и 1-я тип. Машгиза в Лгд, 1949. – 196 с.
5. Шатров, М. Г. Шум автомобильных двигателей внутреннего сгорания / М. Г. Шатров, А. Л. Яковенко, Т. Ю. Кричевская. – М.: МАДИ, 2014. – 68 с.
6. Груданов, В. Я. Научно-практические подходы к совершенствованию конструкций глушителей шума поршневых двигателей внутреннего сгорания на основе теории чисел / В. Я. Груданов, Г. И. Белохвостов, Л. Т. Ткачева // *Наука и техника*. – 2021. – Т. 20, № 5. – С. 434–444. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-5-434-444>
7. Груданов, В. Я. Моделирование и оптимизация гидравлических и акустических характеристик глушителей шума поршневых двигателей на основе теории чисел / В. Я. Груданов, Г. И. Белохвостов, Л. Т. Ткачева // *Горная механика и машиностроение*. – 2020. – № 4. – С. 28–42.
8. Груданов, В. Я. Теория чисел в развитии машиностроительного комплекса Республики Беларусь / В. Я. Груданов, Е. Н. Филидович, Г. И. Белохвостов // *Инженер-механик*. – 2020. – Т. 86, № 1. – С. 7–9.
9. Груданов, В. Я. Моделирование и оптимизация гидравлических и акустических характеристик глушителей шума поршневых двигателей / В. Я. Груданов, Л. Т. Ткачева // *Вестн. Белорус.-Рос. ун-та*. – 2017. – Т. 57, № 4. – С. 17–28.
10. Иванов, Н. И. Борьба с шумом и вибрациями на путевых и строительных машинах / Н. И. Иванов. – М.: Транспорт, 1978. – 272 с.
11. Лубянченко, А. А. Улучшение виброакустических характеристик глушителей шума выпуска двигателей внутреннего сгорания большой мощности: автореф. дис. ... канд. техн. наук / А. А. Лубянченко; БалтГТУ «Военмех» им. Д. Ф. Устинова. – СПб., 2017. – 22 с.
12. Дробаха, М. Н. Снижение внешнего шума транспортных машин глушителями (на примере трактора МТЗ-82): дис. ... канд. техн. наук / М. Н. Дробаха. – СПб., 2004. – 148 л.
13. Разумовский, М. А. Борьба с шумом на тракторах / М. А. Разумовский. – Минск: Наука и техника, 1973. – 208 с.

14. Безручко А. Ф. Улучшение характеристик глушителей шума сельскохозяйственных тракторов: автореф. дис. ... канд. техн. наук / А. Ф. Безручко. – Минск, 1989. – 15 с.
15. Комкин, А. И. Разработка современных методов расчета и проектирования автомобильных глушителей с требуемыми характеристиками: дис. ... д-ра техн. наук / А. И. Комкин; Балтийский госуд. техн. ун-т «Военмех» имени Д. Ф. Устинова. – СПб., 2012. – 48 с.
16. Быков А. И. Исследование акустических характеристик резонаторов Гельмгольца в системах снижения шума: автореф. дис. ... канд. техн. наук / А. И. Быков; БалГТУ «Военмех» им. Д. Ф. Устинова. – СПб., 2021. – 22 с.
17. Белоцерковский, С. В. Автомобильные глушители: современные требования, тенденции развития, методы расчета и испытаний / С. В. Белоцерковский, В. Е. Тольский // Техн. акустика. – 2001. – № 1. – С. 30–37.
18. Груданов, В. Я. Утилизатор тепла отработавших газов / В. Я. Груданов, К. Н. Тупальский, А. Н. Рубанов. // Автомобильная промышленность. – 1986. – № 7. – С. 11–12.
19. Груданов, В. Я., Анализ и оценка математической модели процессов утилизации энергии отработавших газов / В. Я. Груданов, С. В. Жестков // Изв. вузов. Энергетика. – 1990. – № 9. – С. 13–16.
20. Груданов, В. Я. Математическое моделирование процессов утилизации энергии отработавших газов ДВС / В. Я. Груданов, Е. И. Широков // Двигателестроение. – 1990. – № 9. – С. 13–16.
21. Бабенко, В. А. Расчетное и экспериментальное исследование гидродинамики и теплообмена в охлаждаемых автомобильных глушителях шума / В. А. Бабенко, В. Я. Груданов // Проблемы тепло- и массообмена в процессах и аппаратах при использовании вторичных энергоресурсов и альтернативных источниках энергии: Междунар. шк.-семинар, сентябрь, 1990. – Минск: ИТМО им. А. В. Лыкова АН БССР, 1990. – С. 66–76.
22. Груданов, В. Я., Теплоотдача и гидравлическое сопротивление в процессах утилизации теплоты отработавших газов двигателей внутреннего сгорания / В. Я. Груданов, В. М. Осипов // Изв. вузов. Энергетика. – 1990. – № 3. – С. 81–84.
23. Груданов, В. Я. Физико-химические и теплообменные процессы в каталитических нейтрализаторах с утилизацией теплоты отработавших газов / В. Я. Груданов // Двигателестроение. – 1991. – № 1. – С. 47–49.

References

1. Quiros D. C., Smith J., Thiruvengadam A., Huai T. Greenhouse gas emissions from heavyduty natural gas, hybrid, and conventional diesel on-road trucks during freight transport. *Atmospheric Environment*, 2017, vol. 168, pp. 36–45. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2017.08.066>
2. Trubaev P. A., Zajtsev E. A., Besedin P. V. Exergic analysis of technological heat devices. *International Journal of Pharmacy and Technology*, 2016, vol. 8, no. 4, pp. 24968–24975.
3. Vulis L. A. *Thermodynamics of Gas Flows*. Moscow, Leningrad, Gosenergoizdat Publ., 1950. 304 p. (in Russian).
4. Inzel L. I. *Fundamentals of Muffling Exhaust Noise of Internal Combustion Engines*. Moscow, Publishing House and 1st Type. Mashgiza in Lgd, 1949. 196 p. (in Russian).
5. Shatrov M. G., Yakovenko A. L., Krichevskaya T. Yu. *Noise of Automobile Internal Combustion Engines*. Moscow, Moscow Automobile and Road Engineering State Technical University, 2014. 68 p. (in Russian).
6. Grudanov V. Ya., Belokhvostov G. I., Tkacheva L. T. Scientific and practical approaches to improving the designs of noise dampers of piston internal combustion engines based on the theory of numbers. *Nauka i tekhnika = Science and Technique*, 2021, vol. 20, no. 5, pp. 434–444 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-5-434-444>
7. Grudanov V. Ya., Belokhvostov G. I., Tkacheva L. T. Modeling and optimization of hydraulic and acoustic characteristics of piston engine noise mufflers based on number theory. *Gornaya mekhanika i mashinostroenie = Mining Mechanical Engineering and Machine-Building*, 2020, no. 4, pp. 28–42 (in Russian).
8. Grudanov V. Ya., Filidovich E. N., Belokhvostov G. I. Number theory in the development of the machine-building complex of the Republic of Belarus. *Inzhener-mekhanik [Mechanical Engineer]*, 2020, vol. 86, no. 1, pp. 7–9 (in Russian).
9. Grudanov V. Ya., Tkacheva L. T. Modeling and optimization of hydraulic and acoustic characteristics of piston engine noise silencers. *Vestnik Belorussko-Rossiiskogo universiteta = The Belarusian-Russian University Herald*, 2017, vol. 57, no. 4, pp. 17–28 (in Russian).
10. Ivanov N. I. *The Fight Against Noise and Vibrations on Track and Construction Machines*. Moscow, Transport Publ., 1978. 272 p. (in Russian).
11. Lubyanchenko A. A. *Improvement of Vibroacoustic Characteristics of Noise Mufflers for the Release of High-Power Internal Combustion Engines*. St. Petersburg, 2017. 22 p. (in Russian).
12. Drobakha M. N. *Reduction of External Noise of Transport Vehicles with Silencers (on the Example of the MTZ-82 Tractor)*. St. Petersburg, 2004. 148 p. (in Russian).
13. Razumovskii M. A. *Noise Control on Tractors*. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1973. 208 p. (in Russian).
14. Bezruchko A. F. *Improving the Characteristics of Noise Silencers of Agricultural Tractors*. Minsk, 1989. 15 p. (in Russian).
15. Komkin A. I. *Development of Modern Methods of Calculation and Design of Automobile Mufflers with the Required Characteristics*. St. Petersburg, 2012. 48 p. (in Russian).
16. Bykov A. I. *Investigation of Acoustic Characteristics of Helmholtz Resonators in Noise Reduction Systems*. St. Petersburg, 2021. 22 p. (in Russian).
17. Belotserkovsky S. V., Tolskyi V. E. The automobile mufflers: the modern requirements, tendencies of development, methods of calculations and tests. *Tekhnicheskaya akustika = Technical Acoustics*, 2001, no. 1, pp. 30–37 (in Russian).

18. Grudanov V. Ya., Tupal'sky K. N., Rubanov A.N. Exhaust gas heat utilizer. *Avtomobil'naya promyshlennost'* [Automotive Industry], 1986, no. 7, pp. 11–12 (in Russian).
19. Grudanov V. Ya., Zhestkov S. V. Analysis and evaluation of the mathematical model of the processes of waste gas energy utilization. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Energetika*. [News of Higher Educational Institutions. Energy], 1990, no. 9, pp. 13–16 (in Russian).
20. Grudanov V. Ya., Shirokov E. I. Mathematical modeling of the processes of utilization of the energy of exhaust gases of the internal combustion engine. *Dvigatelistroyeniye*, 1990, no. 9, pp. 13–16 (in Russian).
21. Babenko V. A., Grudanov V. Ya. Computational and experimental study of hydrodynamics and heat transfer in cooled automobile noise silencers. *Problemy tepla- i massoobmena v protsessakh i apparatakh pri ispol'zovanii vtorichnykh energoresursov i al'ternativnykh istochnikakh energii: Mezhdunarodnaya shkola-seminar, sentyabr', 1990* [Problems of Heat and Mass Transfer in Processes and Apparatuses Using Secondary Energy Resources and Alternative Energy Sources: International School-Seminar, September, 1990]. Minsk, A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the Academy of Sciences of the BSSR, 1990, pp. 66–76 (in Russian).
22. Grudanov V. Ya., Osipov V. M. Heat transfer and hydraulic resistance in the processes of heat utilization of exhaust gases of internal combustion engines. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii Energetika* [News of Higher Educational Institutions. Energy], 1990, no. 3, pp. 81–84 (in Russian).
23. Grudanov V. Ya. Physico-chemical and heat exchange processes in catalytic converters with utilization of exhaust gas heat. *Dvigatelistroyeniye*, 1991, no. 1, pp. 47–49 (in Russian).

Информация об авторах

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

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

Белохвостов Геннадий Иванович – кандидат технических наук, доцент, Белорусский государственный аграрный технический университет (пр. Независимости, 99, 220023, Минск, Республика Беларусь). E-mail: gbelohvostov@gmail.com

Бренч Марина Валерьевна – старший преподаватель, Белорусский государственный аграрный технический университет (пр. Независимости, 99, 220023, Минск, Республика Беларусь). E-mail: rektorat@bsatu.by

Пинчук Анна Андреевна – аспирант, Белорусский государственный аграрный технический университет (пр. Независимости, 99, 220023, Минск, Республика Беларусь). E-mail: rektorat@bsatu.by

Русских Виктор Владимирович – магистрант, Белорусский государственный аграрный технический университет (пр. Независимости, 99, 220023, Минск, Республика Беларусь). E-mail: viktrussk@yandex.by

Information about the authors

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

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

Guennadi I. Belokhvostov – Ph. D. (Engineering), Associate Professor, Belarusian State Agrarian Technical University (99, Nezavisimosty Ave., 220023, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: gbelohvostov@gmail.com

Marina V. Brench – Senior Lecturer, Belarusian State Agrarian Technical University (99, Nezavisimosty Ave., 220023, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: rektorat@bsatu.by

Anna A. Pinchuk – Graduate Student, Belarusian State Agrarian Technical University (99, Nezavisimosty Ave., 220023, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: rektorat@bsatu.by

Viktor V. Russkikh – Master's Student, Belarusian State Agrarian Technical University (99, Nezavisimosty Ave., 220023, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: viktrussk@yandex.by