

Моделирование процесса коагуляции частиц выхлопного газа ультразвуковым глушителем

¹КАДЫРОВ Адиль Суратович, д.т.н., профессор, ludmiila77025@mail.ru,

¹ГАНЮКОВ Александр Анатольевич, PhD, старший преподаватель, sgn2002@mail.ru,

^{1*}САРСЕМБЕКОВ Бауыржан Кобланович, докторант, baurask@mail.ru,

²СҮЮНБАЕВ Шинполат Мансуралиевич, к.т.н., доцент, shinbolat_84@mail.ru,

³ГРАЧЕВ Владимир Васильевич, д.т.н., доцент, v_grach@mail.ru,

¹Карагандинский технический университет, Казахстан, 100027, Караганда, пр. Н. Назарбаева, 56,

²Ташкентский государственный транспортный университет, Узбекистан, 100067, Ташкент, ул. Одилходжаева, 1,

³Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Россия, 190031, Санкт-Петербург, Московский проспект, 9,

*автор-корреспондент.

Аннотация. Авторами предлагается использование ультразвукового излучения в устройстве для очистки выхлопных газов автомобильного транспорта от твердых сажевых частиц. Приведена упрощенная схема ультразвукового глушителя. Описывается процесс коагуляции отработавших газов в ультразвуковом глушителе, который усиливается за счет возникновения стоячей ультразвуковой волны. Составлена математическая модель работы ультразвукового глушителя. Получены уравнения, позволяющие рассчитать конструктивные параметры и режимы работы экспериментальной ультразвуковой установки для очистки выхлопных газов автомобильного транспорта.

Ключевые слова: двигатель внутреннего сгорания, выхлопные газы, ультразвуковой глушитель, ультразвуковая очистка, коагуляция.

Введение

В современное время существует несколько способов очистки выхлопных газов от вредных примесей, таких как углеводород (CH) и монооксид углерода (CO). Наиболее распространенные из них: сухой, влажный, электрический, каталитический и ультразвуковой способы очистки выхлопных газов автомобиля. Сухой метод очистки работает с помощью фильтрующих труб разного диаметра и длины. Мокрый способ газоочистки проводится за счет взаимодействия отработавшего газа с водой и последующего осаждения вредных примесей в фильтрующих элементах. Электрическая очистка газов использует электрофильтры, работа которых основана на ионизации молекул. Каталитический способ очистки выхлопных газов основывается на ускоренных реакциях гетерогенного катализа. Ультразвуковая очистка воздействует на выхлопной газ с помощью интенсивных ультразвуковых волн частотой от 10 до 40 кГц. Ультразвук данной частоты усиливает процесс столкновения твердых частиц газа между собой, тем самым происходит процесс коагуляции [1].

Цель работы – составление математической модели работы ультразвукового глушителя для очистки отработавших газов автомобильного

транспорта, получение уравнений, позволяющих рассчитать необходимые проектируемые параметры и режимы работы экспериментальной ультразвуковой установки для очистки выхлопных газов.

Основные результаты. Приводится математическая модель, описывающая физическую сущность процесса коагуляции отработавших газов автомобиля при воздействии ультразвука. Получены уравнения, которые позволяют рассчитать конструктивные параметры и режимы работы ультразвукового глушителя.

Методы исследования. Описывается физическая сущность процесса ультразвуковой очистки, которая заключается в явлении коагуляции частиц выхлопных газов, усиление которой происходит за счет возникновения стоячей ультразвуковой волны [2, 3, 4].

На сегодняшний день зарегистрированы патенты по ультразвуковой очистке отработавших газов автотранспорта, при возникновении ультразвуковых волн в четвертьволновом резонаторе, без генерации волн [4, 5] и с использованием ультразвукового воздействия в корпусе автомобильного глушителя [6, 7].

Коагуляция сажевых частиц ускоряется под воздействием ультразвука. Ультразвук оказыва-

ет на эмульсии диспергирующее действие, а на аэрозоли – коагулирующее действие. Эффективность процесса коагуляции увеличивается при возникновении стоячих ультразвуковых волн в устройстве для очистки выхлопных газов автомобилей. На рисунке 1 иллюстрируется процесс возникновения стоячих ультразвуковых волн. В данной схеме видно, как прямая и обратная ультразвуковая волны воздействуют друг на друга, тем самым возникает стоячая волна.

Выхлопной газ автомобильного транспорта состоит из сажевых частиц и вредных примесей, таких как СО и СН. Существует ортокинетическая и гидродинамическая коагуляция твердых сажевых частиц. На первом этапе проходит ортокинетическая коагуляция, когда сажевые частицы двигаются хаотично, сталкиваются и слипаются. На втором этапе воздействие ультразвука увеличивает частоту колебаний сажевых частиц, тем самым увеличивается трение частиц и происходит гидродинамическая коагуляция.

Процесс коагуляции описывается уравнениями Бьеркнеса [8, 9, 10].

Математическая модель работы ультразвукового глушителя. Рассмотрим упрощенную схему работы ультразвукового глушителя (УЗГ) (рисунок 1).

В глушитель 1 через патрубок 2 диаметром d_1 подается выхлопной газ, движущийся со скоростью V_1 , который выходит из емкости через трубу 4 со скоростью V_2 . На расстоянии b от края глушителя располагается генератор ультразвуковых волн 3. Генератор ультразвуковых волн излучает ультразвуковые волны 5, которые проходят через столб газа и отражаются от отражателя 7. В случае падения на плоскую границу двух сред возникают стоячие волны, так как отражающая среда и отражатель обладают разными акустическими сопротивлениями. В этом случае образуется зона стоячих волн (А), в которой происходит гидро-

динамическая коагуляция. Частицы выхлопного газа смещаются в сторону выхлопной трубы со скоростью V . Коагулирующиеся частицы осаживаются на дне глушителя, с наибольшей вероятностью в выемке 6 – сливной ёмкости, имеющей закрывающееся отверстие.

Рассмотрим схему сил, действующих на твердую частицу выхлопного газа автомобилей в плоских декартовых координатах (рисунок 2).

По оси y на частицу действует сила тяжести mg , знакопеременная нагрузка F_a , заставляющая частицу колебаться вокруг определенной точки, силы гидродинамического трения Бьеркнеса F_r , давление, создаваемое выхлопным газом F_d . По оси x на частицу действует давление со стороны выхлопной трубы F_{dx} , давление создаваемое колеблющимися частицами F_a и гидродинамическое трение F_r .

В векторной форме уравнения движения частицы будут иметь вид:

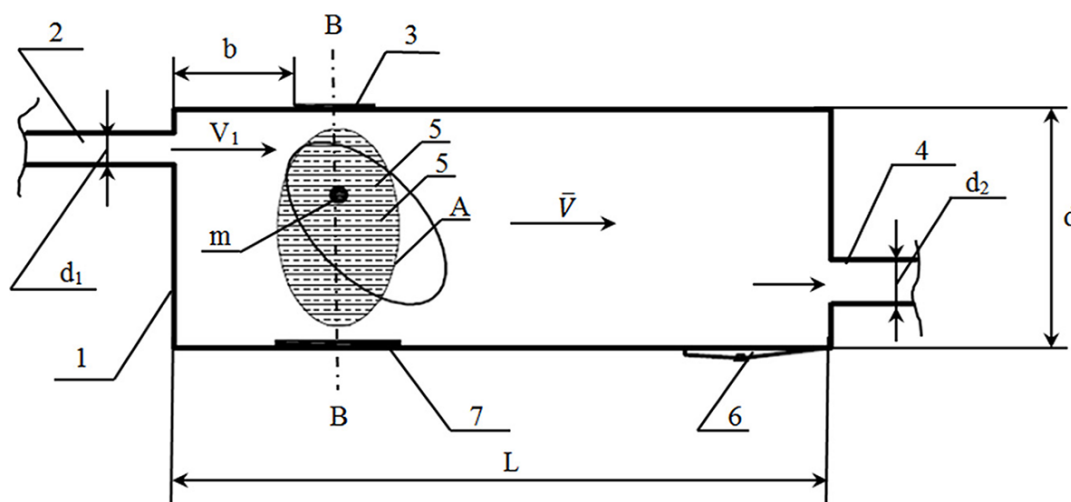
$$\begin{cases} \overline{F}_u^x + \overline{F}_d + \overline{F}_a + \overline{F}_r = 0, \\ \overline{F}_u^y + \overline{F}_a + \overline{F}_d + \overline{F}_r + P = 0. \end{cases} \quad (1)$$

где $\overline{F}_u^x$ и $\overline{F}_u^y$ – соответственно силы инерции по осям x и y ; P – сила тяжести.

В общем виде система дифференциальных уравнений будет иметь вид:

$$\begin{cases} m\ddot{x} = \frac{\pi r^2 d^2}{D^2} p^2 - \pi r^2 \rho c \omega \cos \omega \left(t - \frac{n}{c} \right) - 6\pi \mu r \dot{x}, \\ m\ddot{y} = -\pi r^2 a \rho c \omega \cos \omega \left(t - \frac{n}{c} \right) - \frac{\pi r^2 d_k^2}{D^2} p_k - \\ - 6\pi \mu r \dot{y} + mg, \end{cases} \quad (2)$$

где m – масса частицы; $\ddot{x}, \ddot{y}$ – ускорение по соответствующим осям; r – радиус частицы; d – диаметр входной трубы; D – диаметр у/з глушителя; p – давление, создаваемое ультразвуковой волной; ρ – плотность частицы; c – скорость звука; ω – угловая скорость; t – время; n – фазовая скорость;



1 – корпус глушителя; 2 – патрубок от двигателя; 3 – ультразвуковой генератор; 4 – выхлопная труба; 5 – прямая и обратная ультразвуковая волна; 6 – сливная емкость; 7 – отражатель волны

Рисунок 1 – Упрощенная схема работы ультразвукового глушителя

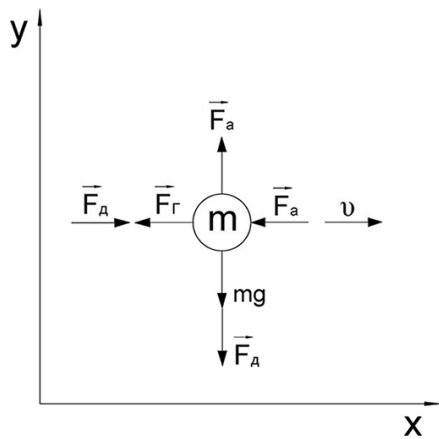


Рисунок 2 – Схема сил, действующих на частицу выхлопного газа автомобилей

$\frac{n}{c}$ – фазовая постоянная; μ – динамическая вязкость; a – амплитуда смещения; p_k – давление в коллекторе; mg – сила тяжести.

Общее решение системы будет иметь вид:

$$\begin{cases} x = \frac{\dot{x}_0}{A}[1 - e^{-At}] + \frac{BP_k}{A}t + \frac{E}{\omega^2 + A^2} \times \\ \times \left[\cos \omega \left(t - \frac{n}{c} \right) - \frac{A}{\omega} \sin \omega \left(t - \frac{n}{c} \right) \right], \\ y = \frac{\dot{y}_0}{A}[1 - e^{-At}] + \frac{g - B}{A}t + \frac{EA}{\omega^2 + A^2} \times \\ \times \left[\cos \omega \left(t - \frac{n}{c} \right) - \frac{A}{\omega} \sin \omega \left(t - \frac{n}{c} \right) \right], \end{cases} \quad (3)$$

где $\dot{x}_0, \dot{y}_0$ – начальные скорости частиц;

$A = \frac{6\pi\mu r}{m}$; $B = \frac{\pi r^2 d_k^2}{D^2 m}$; $E = \frac{\pi r^2 \rho c \omega}{m}$ – постоянные коэффициенты решений.

Считая, что скорости движения частицы по

осям равны $\dot{x}$ и $\dot{y}$, и частица проходит расстояние L и часть или полностью отрезок d , получим, что время оседания частицы (по оси OY) должно быть меньше времени выхода частицы из глушителя:

$$t_y < t_x \quad (4)$$

или

$$\frac{d}{y} < \frac{L}{x}. \quad (5)$$

Дополнительным условием работы является зависимость коагуляции.

Условие работы ультразвукового глушителя определяется уравнениями:

$$\frac{\dot{y}}{\dot{x}} < \frac{L}{D}, \quad (6)$$

$$Z = \frac{\rho r^2 f}{\eta}. \quad (7)$$

Эти уравнения определяют условия осаждения сажи в глушителе исходя из того, что время движения частиц по оси X должно быть больше времени их коагуляции.

Уравнения (6) и (7) позволили рассчитать конструктивные параметры и режим работы эксплуатируемой установки.

Результаты и обсуждение

Проведен эксперимент с целью определения массы и длины осаживания сажи выхлопного газа автомобиля без воздействия и под воздействием ультразвука при 1000 и 1250 оборотах коленчатого вала двигателя в минуту. Результаты эксперимента подтверждены на ультразвуковом стенде (рисунок 3). Схема экспериментального ультразвукового стенда представлена на рисунке 4.

В ходе проведения эксперимента применя-



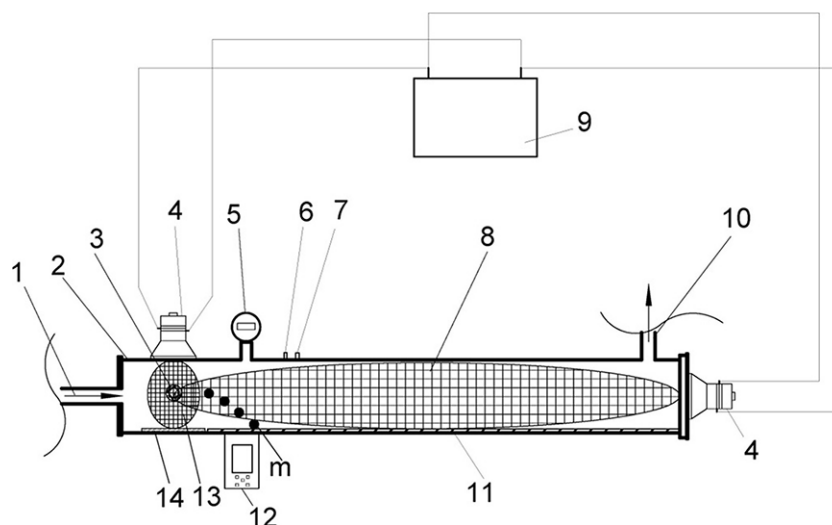
Рисунок 3 – Экспериментальный ультразвуковой стенд

лась труба длиной 2000 мм и диаметром 108 мм. На рисунках 5 и 6 показаны экспериментальные графики зависимости массы осевшей сажи от длины стенда (L). Расстояние осаждения показывает эффективность работы установки по длине и наиболее эффективные варианты установки ультразвуковых излучателей в устройстве по очистке выхлопного газа.

Как следует из графиков, существует локальный максимум осаждения сажи на расстоянии 40 см от выхлопной трубы. Причем наибольшее осаждение дает два излучателя, а продольный излучатель эффективнее поперечного.

Выводы

В целях сокращения транспортных выбросов в атмосферу и очистки отработавших газов автотранспорта, авторами выполнена исследовательская работа по использованию ультразвукового излучения в устройстве для очистки отработавших газов двигателей внутреннего сгорания автомобилей от твердых сажевых частиц. Создана упрощенная схема ультразвукового глушителя. Описан процесс коагуляции отработавших газов в ультразвуковом глушителе, который усиливается за счет возникновения стоячей ультразвуковой волны. Составлена математическая модель



1 – входной патрубок; 2 – корпус у/з глушителя; 3 – электронный микроскоп МИКМЕД 2.0; 4 – ультразвуковой излучатель; 5 – электронный манометр; 6 – датчик температуры; 7 – влагомер; 8 – область воздействия продольных ультразвуковых волн; 9 – ультразвуковой генератор; 10 – выходной патрубок; 11 – место сбора сажи; 12 – термометр-гигрометр; 13 – область воздействия поперечных у/з волн; 14 – отражатель

Рисунок 4 – Схема экспериментального ультразвукового стенда

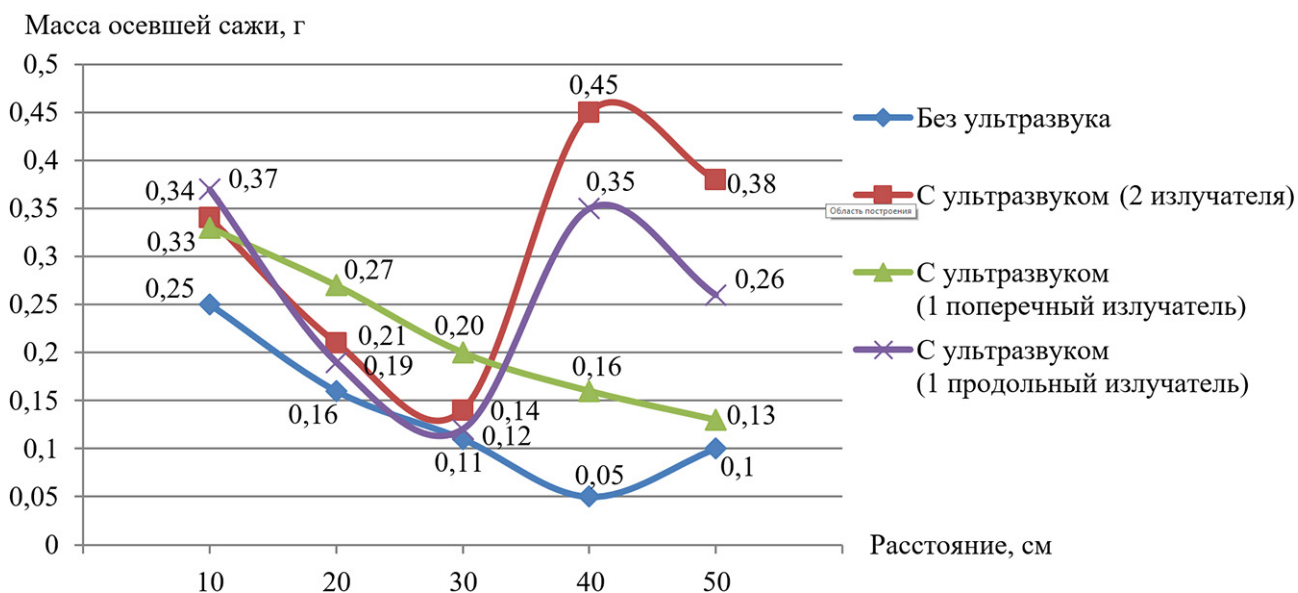


Рисунок 5 – График зависимости массы осевшей сажи от расстояния осаждения при 1000 оборотах коленчатого вала в минуту

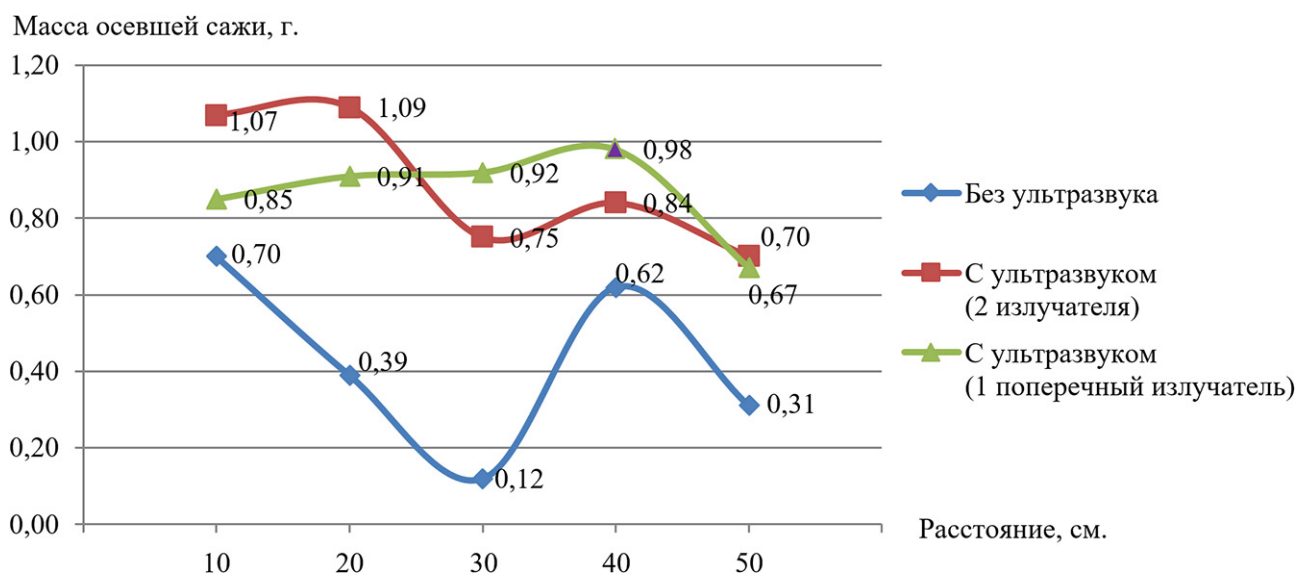


Рисунок 6 – График зависимости массы осевшей сажи от расстояния осаждения при 1250 оборотах коленчатого вала в минуту

работы ультразвукового глушителя. Получены уравнения, позволяющие рассчитать конструктивные параметры и режимы работы экспериментальной ультразвуковой установки для очистки выхлопных газов автомобильного транспорта.

Суммарная масса осевшей сажи в экспери-

ментальном устройстве под действием ультразвука превосходит массу осевшей сажи без ультразвука более чем в 1,5 раза.

В статье доказана гипотеза уменьшения вредных выбросов за счет применения ультразвуковых устройств.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кораблев Р.А., Белокуров В.П., Зеликов В.А., Лихачев Д.В., Разгоняева В.В., Бойко Н.И. Экологическая безопасность автотранспорта. – Воронеж, 2011.
2. Радж Балдев, Раджендран В., Паланичами П. Применение ультразвука. – М.: Техносфера, 2006. – 576 с.
3. Бергман Л. Ультразвук и его применение в науке и технике / Бергман Л.; Пер. с нем. В.С. Григорьева и Л.Д. Розенберга. – М.: Издательство иностранной литературы, 1957. – 726 с.
4. Ибатов М.К., Кадыров А.С., Пак И.А., Кадырова И.А., Аскаров Б.Ш. Результаты экспериментальных исследований работы емкостного оборудования ультразвуковой очистки отработавших газов автотранспорта // Уголь. 2020. № 2. С. 73-78. DOI: 10.18796/0041-5790-2020-2-73-78.
5. Савиных Ю.А., Логачев В.Г., Логачев С.В., Васильева А.Ю. Патент RU 2 364 736 C2 Способ очистки выхлопных автомобильных газов от частиц // заявл. 20.12.2008; опубл. 20.08.2009. Бюл. № 23.
6. Савиных Ю.А., Логачев В.Г., Логачев С.В., Васильева А.Ю. Патент RU 2 373 409 C2 Устройство для очистки выхлопных автомобильных газов от частиц // заявл. 10.06.2009; опубл. 20.11.2009. Бюл. № 32.
7. Ибатов М.К., Кадыров А.С., Балабаев О.Т., Аскаров Б.Ш., Пак И.А. Патент РК № 3194. Устройство для ультразвуковой очистки выхлопных газов // заявл. 20.12.2017; опубл. 02.10.2018.
8. Riera-Franco de Sarabia, Elvira-Segura, González-Gómez, Rodríguez-Maroto, Muñoz-Bueno, Dorronsoro-Areal Investigation of the influence of humidity on the ultrasonic agglomeration of submicron particles in diesel exhausts – Ultrasonics, Volume 41, Issue 4, June 2003, Pages 277-281.
9. Dong, S., Lipkens, B., Cameron, T.V. The effects of orthokinetic collision, acoustic wake, and gravity on acoustic agglomeration of polydisperse aerosols / Journal of Aerosol Science, Volume 37, Issue 4, April 2006, Pages 540-553.
10. Dianov, D.V., Podolski, A.A., Turubarov, V.I. Calculation of the hydrodynamic interaction of aerosol particles in a sound field under Oseen flow conditions / Soviet Physics Acoustics-USSR (1968), 13, p. 314.

Пайдаланылған газ бөлшектерінің коагуляция процесін ультрадыбыстық сөндіргішпен модельдеу

¹КАДЫРОВ Адиль Суратович, т.ф.д., профессор, ludmiila77025@mail.ru,

¹ГАНЮКОВ Александр Анатольевич, PhD, аға оқытушы, sgn2002@mail.ru,

^{1*}САРСЕМБЕКОВ Бауыржан Кобланович, докторант, baurask@mail.ru,

²СУЮНБАЕВ Шинполат Мансуралиевич, т.ф.к., доцент, shinbolat_84@mail.ru,

³ГРАЧЕВ Владимир Васильевич, т.ф.д., доцент, v_grach@mail.ru,

¹Қарағанды техникалық университеті, Қазақстан, 100027, Қарағанды, Н. Назарбаев даңғылы, 56,

²Ташкент мемлекеттік көлік университеті, Өзбекстан, 100067, Ташкент, Одилходжаев көшесі, 1,

³Император Александр I Санкт-Петербург мемлекеттік көлік университеті, Ресей, 190031,

Санкт-Петербург, Московский даңғылы, 9,

*автор-корреспондент.

Аңдатпа. Авторлар ультрадыбыстық сәулеленуді іштен жану қозғалтқыштардан шығатын газдағы қатты бөлшектерден тазартатын құрылғыда қолдануды ұсынады. Ультрадыбыстық дыбыс сөндіргіштің жеңілдетілген диаграммасы ұсынылған. Пайдаланылған газдардың ультрадыбыстық дыбыс сөндіргіштің ішіндегі коагуляция процесі сипатталған. Тұрақты ультрадыбыстық толқынның пайда болуына байланысты коагуляция процесінің тиімділігін арттыру. Тұрақты толқындар - бұл интерференцияның ерекше жағдайы, мұнда екі бірдей толқын қарама-қарсы бағытта таралады. Ультрадыбыстық дыбыс сөндіргіш жұмысының математикалық моделі құрастырылды. Автомобиль көлігінің пайдаланылған газдарын тазартуға арналған эксперименттік ультрадыбыстық қондырғының жобалық параметрлері мен жұмыс режимін есептеуге мүмкіндік беретін теңдеулер алынды.

Кілт сөздер: іштен жанатын қозғалтқыш, пайдаланылған газдар, ультрадыбыстық сөндіргіш, ультрадыбыстық тазарту, коагуляция.

Modeling the Process of Coagulation of Exhaust Gas Particles by an Ultrasonic Muffler

¹KADYROV Adil, Dr. Tech. Sci., Professor, ludmiila77025@mail.ru,

¹GANYUKOV Alexandr, PhD, Senior Lecturer, sgn2002@mail.ru,

¹*SARSEMBEKOV Bauyrzhan, doctoral student, baurask@mail.ru,

²SUYUNBAYEV Shinpolat, Cand. Tech. Sci., Associate Professor, shinbolat_84@mail.ru,

³GRACHEV Vladimir, Dr. Tech. Sci., Associate Professor, v_grach@mail.ru,

¹Karaganda Technical University, Kazakhstan, 100027, Karaganda, N. Nazarbayev Avenue, 56,

²Tashkent State Transport University, Uzbekistan, 100067, Tashkent, Odilkhodzhaev Street, 1,

³Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, Russia, 190031, St. Petersburg, Moskovsky Avenue, 9,

*corresponding author.

Abstract. The authors propose the use of ultrasonic radiation in a device for cleaning the exhaust gases of internal combustion engines from solid particles. A simplified diagram of an ultrasonic muffler is presented. The process of coagulation of exhaust gases in an ultrasonic silencer is described. Increasing the efficiency of the coagulation process due to the appearance of a standing ultrasonic wave. Standing waves are a special case of interference, when two identical waves propagate in opposite directions. A mathematical model of the ultrasonic silencer operation has been compiled. Equations have been obtained that allow calculating the design parameters and operating mode of an experimental ultrasonic installation for cleaning exhaust gases from motor vehicles.

Keywords: internal combustion engine, exhaust gases, ultrasonic muffler, ultrasonic cleaning, coagulation.

REFERENCES

1. Korablev R.A., Belokurov V.P., Zelikov V.A., Lihachev D.V., Razgonyaeva V.V., Bojko N.I. Ekologicheskaya bezopasnost' avtotransporta. – Voronezh, 2011.
2. Radzh Baldev, Radzhendran V., Palanichami P. Primenenie ul'trazvuka. – Moscow: Tekhnosfera, 2006. – 576 p.
3. Bergman L. Ul'trazvuk i ego primeneniye v nauke i tekhnike / Bergman L.; Per. s nem. V.S. Grigor'eva i L.D. Rozenberga. – Moscow: Publ. inostrannoy literatury, 1957. – 726 p.
4. Ibatov M.K., Kadyrov A.S., Pak I.A., Kadyrova I.A., Askarov B.SH. Rezul'taty eksperimental'nykh issledovaniy raboty emkostnogo oborudovaniya ul'trazvukovoy ochistki otrabotavshih gazov avtotransporta // Ugol'. 2020. No. 2. pp. 73-78. DOI: 10.18796/0041-5790-2020-2-73-78.
5. Savinyh YU. A., Logachev V.G., Logachev S.V., Vasil'eva A.YU. Patent RU 2 364 736 C2 Sposob ochistki vyhlopnih avtomobil'nyh gazov ot chastic // zayavl. 20.12.2008; opubl. 20.08.2009. Byul. No. 23.
6. Savinyh YU.A., Logachev V.G., Logachev S.V., Vasil'eva A.YU. Patent RU 2 373 409 C2 Ustrojstvo dlya ochistki vyhlopnih avtomobil'nyh gazov ot chastic // zayavl. 10.06.2009; opubl. 20.11.2009. Byul. No. 32.
7. Ibatov M.K., Kadyrov A.S., Balabaev O.T., Askarov B.SH., Pak I.A. Patent RK №3194. Ustrojstvo dlya ul'trazvukovoy ochistki vyhlopnih gazov // zayavl. 20.12.2017; opubl. 02.10.2018.
8. Riera-Franco de Sarabia, Elvira-Segura, González-Gómez, Rodríguez-Maroto, Muñoz-Bueno, Dorronsoro-Areal Investigation of the influence of humidity on the ultrasonic agglomeration of submicron particles in diesel exhausts – Ultrasonics, Volume 41, Issue 4, June 2003, Pages 277-281.
9. Dong, S., Lipkens, B., Cameron, T.V. The effects of orthokinetic collision, acoustic wake, and gravity on acoustic agglomeration of polydisperse aerosols/Journal of Aerosol Science, Volume 37, Issue 4, April 2006, Pages 540-553.
10. Dianov, D.V., Podolski, A.A., Turubarov, V.I. Calculation of the hydrodynamic interaction of aerosol particles in a sound field under Oseen flow conditions / Soviet Physics Acoustics-USSR (1968), 13, p. 314.