

ПЛАНИРОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА ПО ОЧИСТКЕ ВЫХЛОПНЫХ ГАЗОВ УЛЬТРАЗВУКОМ

А.С. Кадыров, Б.К. Сарсембеков, А.Б. Кукешева
Карагандинский технический университет,
г. Караганда, Республика Казахстан

АННОТАЦИЯ

Введение. В статье рассмотрен вопрос защиты окружающей среды от вредных компонентов отработавших газов автомобиля. С целью решения этой проблемы предложена разработка дополнительного устройства к выхлопной системе двигателя внутреннего сгорания на основе метода очистки ультразвуковой коагуляцией.

Материалы и методы. В связи с необходимостью создания экологически безопасной выхлопной системы автомобиля планируется провести эксперимент, определяющий скорость оседания частиц газа на ультразвуковом стенде. Правильная постановка эксперимента требует проведения предварительного теоретического анализа и уменьшения количества параметров, имеющих влияние на эксперимент. Во время проведения эксперимента число рассматриваемых параметров должно достаточно точно отражать основные процессы и их взаимодействия. Однако процесс ультразвуковой коагуляции зависит от большинства параметров, таких как скорость оседания частиц, давление ультразвуковой волны, амплитуда колебаний, частота колебаний ультразвука, радиус частиц, динамическая вязкость, ускорение силы тяжести и массы частиц, которые могут усложнить и увеличить время проведения экспериментальных работ. С целью уменьшения набора переменных был применен метод теории подобия и анализа размерностей. Данный метод позволяет сократить число опытов и сэкономить время, средства и другие ресурсы, затрачиваемые на эксперимент при большом количестве параметров.

Результаты. В результате было получено минимальное количество безразмерных критериев, позволяющих повысить эффективность обработки экспериментальных данных на ультразвуковом стенде.

Заключение. Таким образом, полученные безразмерные критерии позволяют составить план эксперимента по определению скорости оседания частиц отработавших газов автомобиля на ультразвуковом стенде и подтвердить применимость метода очистки ультразвуковой коагуляцией.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: автомобильный транспорт, двигатель внутреннего сгорания, ультразвуковой стенд, метод ультразвуковой коагуляции, анализ размерностей, критерии подобия, план эксперимента.

Поступила 07.12.20, принята к публикации 26.02.21.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Для цитирования: Кадыров А.С. Планирование эксперимента по очистке выхлопных газов ультразвуком / А.С. Кадыров, Б.К. Сарсембеков, А.Б. Кукешева. – DOI <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-1-86-95> // Вестник СибАДИ. – 2021. – Т. 18, № 1(77). – С. 86–95.



DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-1-86-95>

PLANNING AN EXPERIMENT FOR CLEANING EXHAUST GASES WITH ULTRASOUND

Adil S. Kadyrov, Bauyrzhan K. Sarsembekov, Alia B. Kukisheva

Karaganda Technical University,
Karaganda, Republic of Kazakhstan

ABSTRACT

Introduction. The article deals with the protection of the environment from harmful components of the exhaust gases of a motor vehicle. In order to solve this problem, it is proposed to develop an additional device to the exhaust system of an internal combustion engine, based on the ultrasonic coagulation cleaning method.

Materials and methods. Due to the need for an environmentally friendly vehicle exhaust system, an experiment is planned to determine the particle gas settling rate on the ultrasonic stand. The correct setting of the experiment requires a preliminary theoretical analysis and a reduction in the number of parameters influencing the experiment. At the time of the experiment, the number of parameters considered should reflect the main processes and their interactions fairly accurately. However, ultrasonic coagulation depends on most parameters, such as particle settling velocity, ultrasonic wave pressure, oscillation amplitude, ultrasonic frequency, particle radius, dynamic viscosity, gravity acceleration and particle mass, which can complicate and increase the time for experimentation. The method of similarity theory and dimensional analysis was used to reduce the set of variables. This method reduces the number of experiments and saves time, costs and other resources spent on the experiment with a large number of parameters.

Results. As a result, a minimum number of dimensional criteria were obtained to improve the efficiency of the ultrasonic screen processing of experimental data.

Conclusion. Thus, the dimensionless criteria obtained make it possible to draw up a plan for an experiment to determine the settling rate of car exhaust gas particles on an ultrasonic stand and confirm the applicability of the ultrasonic coagulation treatment method.

KEYWORDS: road transport, internal combustion engine, ultrasonic stand, ultrasonic coagulation method, dimensional analysis, similarity criteria, experimental plan.

Submitted 07.12.20, revised 26.02.21.

The authors have read and approved the final manuscript.

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.

For citation: Kadyrov A.S., Sarsembekov B.K., Kukisheva A. B. Planning an experiment for cleaning exhaust gases with ultrasound. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2021; 18 (1):86-95. DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-1-86-95>

© Kadyrov A.S., Sarsembekov B.K., Kukisheva A.B., 2021



Content is available under the license
Creative Commons Attribution 4.0 License.

ВВЕДЕНИЕ

Развитие общества, научно-технический прогресс, неуклонный рост производства и потребления оказывают непосредственное влияние на разрушение природной среды нашей планеты. Автомобиль вносит свой значительный вклад в загрязнение окружающей среды, и в отличие от промышленных предприятий, концентрирующихся в определенной зоне, является передвижным источником загрязнения, чем рассеивает в атмосферу вредные компоненты выхлопных газов двигателей внутреннего сгорания [1]. Согласно статистике, которая ведется по всему миру, автомобильный парк ежегодно выделяет 2 млрд т топлива и выбрасывает в атмосферу около 700 млн т вредных веществ, в том числе 420 млн т оксида углерода (CO), 170 млн т углеводородов (CH), 60 млн т оксида азота (NOX), 17 млн т сажи и 0,6 млн т свинца. Вследствие этого разрушается среда обитания, качество жизни человека и других популяций ¹.

В настоящее время актуальным вопросом является создание экологически безопасного автотранспортного средства посредством сокращения в нем объема вредных выбросов выхлопных газов. По этой причине многие научные исследования идут в направлении совершенствования системы выпуска отработавших газов двигателей внутреннего сгорания, в том числе рассматривается возможность разработки дополнительного устройства к глушителю, повышающее эффективность нейтрализации выхлопных газов [2]. Однако будущее устройство не сможет обеспечить полную экологическую безвредность отработавших газов, если не использовать в нем эффективный метод очистки. В связи с этим был проведен литературный анализ существующих методов очистки отработавших газов.

По результатам литературного анализа было установлено, что большинство рассмотренных методов предназначено для очистки крупных частиц газов и не могут полноценно очищать газы от вредных, мелких частиц [3]. Также многие методы могут применяться только на крупных установках, а размеры будущего

устройства должны быть компактными, так как оно должно быть беспрепятственно установлено в систему выпуска отработавших газов автомобиля [4]. Следовательно, сделан вывод о целесообразности применения метода ультразвуковой коагуляции в работе будущего устройства, так как этот метод позволяет повысить эффективность процесса коагуляции, направленный на увеличение массы и размеров частиц отработавшего газа. Кроме того, метод ультразвуковой коагуляции может использоваться как самостоятельное средство по очистке выхлопных газов автомобиля, так и в сочетании с другими методами очистки [5]. Прежде чем экспериментально подтвердить применение метода ультразвуковой коагуляции на дополнительном устройстве, необходимо изучить его физическую сущность. С этой целью был рассмотрен физический процесс коагуляции и влияние на него действующего ультразвука.

Ультразвук – это упругие волны высокой частоты. Ухо человека воспринимает распространяющиеся волны частотой до 16 кГц, а колебания более высокой частоты представляют собой ультразвук [6]. Ультразвуковой диапазон находится от 20 тыс. до нескольких миллиардов Гц. Ультразвуковая очистка воздействует на газ с помощью интенсивных ультразвуковых волн частотой от 10 до 40 кГц². Физическая сущность процесса ультразвуковой очистки газов основана на коагуляции твердых частиц отработавших газов с оседанием их в виде нагара на дно устройства³. Под коагуляцией понимают физико-химический процесс, описывающий слияние мелких твердых частиц газа друг с другом под действием сил притяжения путем создания коагуляционных структур. Процесс коагуляции частиц отработавших газов происходит до воздействия на него ультразвука ⁴.

В основном после того, как газ попал под действие ультразвука, можно наблюдать две стадии процесса коагуляции, происходящие в частицах. На первом этапе газ подвергается действию ультразвукового поля, от которого возрастает вибрация и частицы, столкнув-

¹ Марчук Г.И., Кондратьев К.Я. Приоритеты глобальной экологии. Москва, Наука, 1992. 264 с.

² Бабиков О.И. Ультразвук и его применение в промышленности. Москва, Государственное издательство физико-математической литературы, 1958. 260 с.

³ Радж Балдев, Раджендран В., Паланичами П. Применения ультразвука. Москва, Техносфера, 2006. 576 с.

⁴ Бергман Л., Григорьева В.С., Розенберг Л.Д. Ультразвук и его применение в науке и технике. Москва, Издательство иностранной литературы, 1957. 726 с.

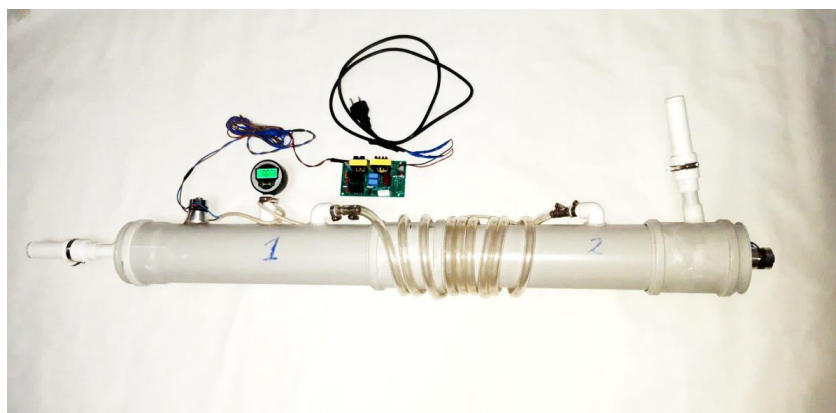


Рисунок 1 – Экспериментальный ультразвуковой стенд

Figure 1 – Experimental ultrasound stand

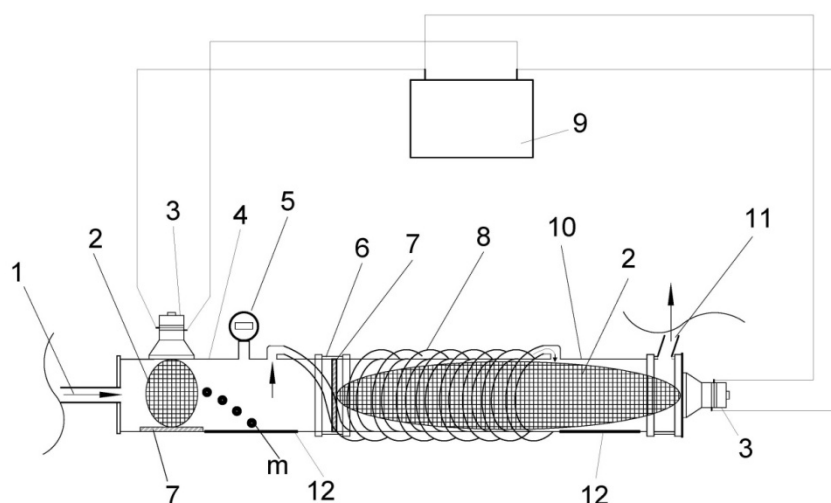


Рисунок 2 – Схема экспериментального ультразвукового стенда:
1 – входной патрубок; 2 – область воздействия ультразвуковых волн; 3 – ультразвуковой излучатель; 4 – секция №1;
5 – электронный манометр; 6 – муфта; 7 – отражатель; 8 – прозрачный шланг; 9 – ультразвуковой генератор;
10 – секция №2; 11 – выходной патрубок; 12 – место сбора сажи

Figure 2 – Scheme of the experimental ultrasound stand:
1 – inlet pipe; 2 – area of influence of ultrasonic waves; 3 – ultrasonic emitter; 4 – section No. 1; 5 – electronic pressure gauge;
6 – clutch; 7 – reflector; 8 – transparent hose; 9 – ultrasonic generator; 10 – section 2; 11 – outlet branch pipe;
12 – place of collection of soot

шись друг с другом, совершают хаотическое движение. В результате нескольких таких столкновений и под действием сил взаимного притяжения наблюдается процесс слипания частиц, после которого они увеличиваются в размерах. На втором этапе большие частицы продолжают совершать хаотичные движения, но при этом не следуют за ультразвуковыми

колебаниями, в то время как мелкие частицы следуют за ультразвуковыми колебаниями среды⁵. Поскольку амплитуды у каждой частицы в зависимости от их размеров могут быть разными, то процесс их взаимодействия друг с другом и последующее соединение продолжается. Каждому размеру частиц соответствует определенная частота колебания, при более

⁵ Майер В.В. Простые опыты с ультразвуком. Москва, Наука, 1978. 160 с.

высоких частотах амплитуда колебания уменьшается. После завершения действия ультразвукового поля процесс коагуляции в частицах не прекращается, однако его темп постепенно уменьшается. В конечном итоге частицы постепенно опускаются вниз и оседают на дне рассматриваемой среды [7]. Из этого можно сделать следующий вывод: между частицами существует свой собственный процесс коагуляции, но сам процесс проходит очень медленно, а ультразвуковое поле способствует к увеличению темпа коагуляции частиц [8].

Группа ученых Карагандинского технического университета разрабатывает стенд для определения параметров ультразвуковой коагуляции по очистке отработавшего газа автомобильного транспорта (рисунок 1, 2) [9, 10].

Экспериментальный ультразвуковой стенд (см. рисунок 2) состоит из двух секций 4 и 10 диаметром 110 мм, соединенных между собой прозрачным шлангом 8 диаметром 14 мм. В каждой из секций установлено ультразвуковое оборудование, состоящее из ультразвукового генератора 9, ультразвуковых излучателей 3 и отражателей ультразвуковых волн 7⁷.

Эффективность работы выше описанной конструкции стенда нуждается в экспериментальном подтверждении, которая может быть доказана с помощью определения скорости оседания частиц выхлопных газов на дне устройства [11, 12]. Перед проведением соответствующих экспериментальных работ необходимо заранее составить план эксперимента, согласно которому число параметров, описывающих процесс оседания частиц газа, должно быть минимальным и отражать основные их взаимодействия в наиболее удобной форме [13, 14].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Правильная постановка эксперимента требует проведения предварительного теоретического анализа и по возможности минимального выбора числа параметров. Однако скорость оседания частиц газа под воздействием ультразвуковой коагуляции зависит от значитель-

ного числа параметров (переменных), таких как давление ультразвуковой волны, амплитуда колебаний, частота колебаний ультразвука, динамическая вязкость, ускорение силы, масса и радиус частиц. Большое число параметров усложняет процесс проведения экспериментальных работ, увеличивает число опытов и продолжительность его проведения⁸. В следствии этого, с целью уменьшения набора переменных, необходимо использовать метод теории подобия и анализ размерностей, который широко применим в рассмотрении сложных процессов и в значительной степени может облегчить обработку экспериментов при большом количестве параметров, тем самым сократив число опытов, сэкономив время и средства на эксперимент⁹.

Для правильного применения метода теории подобия и анализа размерностей в эксперименте необходимо знать характер и число фундаментальных переменных. Под фундаментальными переменными понимается величина, которая влияет на эксперимент и изменяется независимо от других переменных [15]. Согласно этому были рассмотрены следующие переменные, имеющие влияние на процесс ультразвуковой коагуляции: скорость оседания частиц (V), давление ультразвуковой волны (P), амплитуда колебаний (A), частота колебаний ультразвука (f), радиус частиц (r), динамическая вязкость (μ), ускорение силы тяжести (g), масса частиц (m). В итоге мы получили восемь фундаментальных переменных, зависящих от скорости падения частиц, зависимость которых можно записать в следующем виде (1):

$$V = \bar{V}(P, A, f, r, \mu, g, m). \quad (1)$$

Затем, согласно теореме Букингема, полученное функциональное соотношение можно выразить через безразмерные комбинации. Теорема Букингема гласит: «Если какое-либо уравнение однородно относительно размерностей, то его можно преобразовать к соотношению, содержащему набор безразмерных

⁶ Кадыров А.С., Аскаров Б.Ш., Кабаев Д.Д., Ибатов М.К., Грузин В.В. Устройства для очистки выхлопных газов. Патент РК, № 26102, 2012.

⁷ Ибатов М.К., Кадыров А.С., Пак И.А., Аскаров Б.Ш., Кабаев Д.Д. Устройство для изоляции отработавших газов. Патент РК, №26623, 2012.

⁸ Клепиков Н.П., Соколов С.Н. Анализ и планирование экспериментов методом подобия, Москва, Наука, 1964. 181 с.

⁹ Седов Л.И. Методы подобия и размерности в механике. Москва, Главная редакция физико-математической литературы издательства «Наука», 1977. 440 с.

Таблица 1
Перечень формул размерностей для основных величин переменных

Table 1
List of dimensional formulas for basic variables

№	Название переменной	Обозначение	Единица измерения	Формула размерности
1	Скорость оседания частиц	V	м/с	$L\theta^{-1}$
2	Давление ультразвуковой волны	P	Па=Н/м ²	$M L^{-1} \theta^{-2}$
3	Амплитуда колебаний	A	м	L
4	Частота колебаний ультразвука	f	с ⁻¹	θ^{-1}
5	Радиус частиц	r	м	L
6	Динамическая вязкость	μ	Пас	$ML^{-1} \theta^{-1}$
7	Ускорение силы тяжести	g	м/с ²	$L\theta^{-2}$
8	Масса частиц	m	кг	M

комбинаций величин»¹⁰. Для этого выразим размерность переменных по отношению к трем основным единицам: длины L , массы M и времени θ . Для основных величин формулы размерностей были приведены в таблице 1.

Допустим теперь, что между этими величинами существует следующее соотношение (2):

$$(P^a, A^b, f^c, r^d, \mu^e, g^k, m^n) = V. \quad (2)$$

Поставим формулы размерности, взятые из таблицы 1, на место символов размерности (3):

$$\varphi[(ML^{-1}\theta^{-2})^a, L^b, (\theta^{-1})^c, L^d, (ML^{-1}\theta^{-1})^e, (L\theta^{-2})^k, M^n] = L\theta^{-1} \quad (3)$$

Чтобы данное уравнение было однородным относительно равномерностей, должны выполняться следующие соотношения между показателями степени (4), (5), (6):

$$\text{для } L: 1 = -a + b + d - e + k; \quad (4)$$

$$\text{для } M: 0 = a + e + n; \quad (5)$$

$$\text{для } \theta: -1 = -2a - c - e - 2k. \quad (6)$$

Имеем три уравнения с семью неизвестными. Упростим их, преобразовав следующим образом: $a = -e - n$, $b = 1 - n - d - k$, $c = 1 + e + 2n - 2k$. Подставляя эти соотношения для показателей степени в формулу (2), получим формулу (7):

$$\varphi(P^{(-e-n)}, A^{(1-n-d-k)}, f^{(1+e+2n-2k)}, r^d, \mu^e, g^k, m^n) = V \quad (7)$$

Объединяя члены с одинаковыми показателями степени, легко составить безразмерные комбинации (8):

$$\varphi\left[\left(\frac{f\mu}{P}\right)^e, \left(\frac{f^2m}{PA}\right)^n, \left(\frac{r}{A}\right)^d, \left(\frac{g}{Af^2}\right)^k\right] = \frac{V}{Af} \quad (8)$$

Восемь первоначальных переменных задачи дают пять безразмерных комбинаций. Полученное число критериев подтверждается так называемой «пи-теоремой». Согласно теореме: «если существует однозначное соотношение между n физическими величинами, для описания которых используется k основных единиц, то соответствует соотношение между $(n-k)$ безразмерными комбинациями, составленными из этих величин»¹¹. В нашем случае были рассмотрены восемь физических величин, выбраны три основные единицы и согласно этому получены пять безразмерных

¹⁰ Шенк Х. Теория научного эксперимента. Москва, Мир, 1972. 381 с.

¹¹ Кадыров А.С., Кадырова И.А. Основы научных исследований. Караганда, Изд-во КарГТУ, 2015. 269 с.

Таблица 2
План эксперимента матрицы 2³

Table 2
Matrix experiment plan 2³

Номера опытов	x ₁	x ₂	x ₃	У
1	-1	-1	+1	y ₁
2	-1	+1	-1	y ₂
3	+1	-1	-1	y ₃
4	+1	+1	+1	y ₄
5	-1	-1	-1	y ₅
6	-1	+1	+1	y ₆
7	+1	-1	+1	y ₇
8	+1	+1	-1	y ₈

комбинаций. Применяя метод теории подобия и анализ размерностей, мы от обычных физических величин перешли к величинам комплексного типа, таким образом мы легко продвинулись в решении задачи.

В итоге фундаментальные переменные были сокращены и преобразованы в три критерия подобия (9), (10), (11):

$$\frac{\mu A}{f m} = k_1; \quad (9)$$

$$\frac{r P}{f^2 m} = k_2; \quad (10)$$

$$\frac{P g}{f^4 m} = k_3. \quad (11)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ

Критерий k_1 характеризует зависимость коагуляции от вязкости и амплитуды частотной характеристики от ультразвукового генератора. Критерий k_2 учитывает давление с выхлопной трубы, размер частицы и их массу, а критерий k_3 силу, действующую на частицу, ее массу и частоту движения.

Полученные критерии подобия позволяют составить план эксперимента. Для упрощения процесса обработки данных, полученных из опытов эксперимента, подбирается интервал изменения критериев в соответствии с масштабом от +1 (верхний уровень) до -1 (нижний

уровень). Поскольку критерии рассматриваются между двумя уровнями, план эксперимента имеет восемь опытов и соответствует многофакторному плану эксперимента 2³. В связи с этим матрица плана эксперимента имеет следующий вид (таблица 2):

Геометрическая интерпретация этого плана имеет кубическую форму. Для построения графического изображения плана необходимо определить средние, максимальные, минимальные величины критериев, соответствующих координатам куба.

Координатами центра куба является среднее значение критериев подобия (12), (13), (14):

$$\frac{\mu_{cp} A_{cp}}{f_{cp} m_{cp}} = k_{1cp}; \quad (12)$$

$$\frac{r_{cp} P_{cp}}{f_{cp}^2 m_{cp}} = k_{2cp}; \quad (13)$$

$$\frac{P_{cp} g}{f_{cp}^4 m_{cp}} = k_{3cp}. \quad (14)$$

Находим минимальное и максимальное значение безразмерных величин (15), (16), (17), (18), (19), (20):

$$\frac{\mu_{min} A_{min}}{f_{max} m_{max}} = k_{1min}; \quad (15)$$

$$\frac{r_{\min} P_{\min}}{f_{\max}^2 m_{\max}} = k_{2\min}; \quad (16)$$

$$\frac{P_{\min} g}{f_{\max}^4 m_{\max}} = k_{3\min}; \quad (17)$$

$$\frac{\mu_{\max} A_{\max}}{f_{\min} m_{\min}} = k_{1\max}; \quad (18)$$

$$\frac{r_{\max} P_{\max}}{f_{\min}^2 m_{\min}} = k_{2\max}; \quad (19)$$

$$\frac{P_{\max} g}{f_{\min}^4 m_{\min}} = k_{3\max}. \quad (20)$$

По этим данным строим координаты вершин куба (21), (22), (23), (24), (25), (26), (27), (28):

$$(k_{1\max}, k_{2\min}, k_{3\min}); \quad (21)$$

$$(k_{1\min}, k_{2\min}, k_{3\min}); \quad (22)$$

$$(k_{1\min}, k_{2\max}, k_{3\min}); \quad (23)$$

$$(k_{1\max}, k_{2\max}, k_{3\min}); \quad (24)$$

$$(k_{1\max}, k_{2\min}, k_{3\max}); \quad (25)$$

$$(k_{1\min}, k_{2\min}, k_{3\max}); \quad (26)$$

$$(k_{1\min}, k_{2\max}, k_{3\max}); \quad (27)$$

$$(k_{1\max}, k_{2\max}, k_{3\max}). \quad (28)$$

Геометрической интерпретацией полного факторного эксперимента 2^3 служит куб, координатами вершин которого задают условия опытов (рисунок 3).

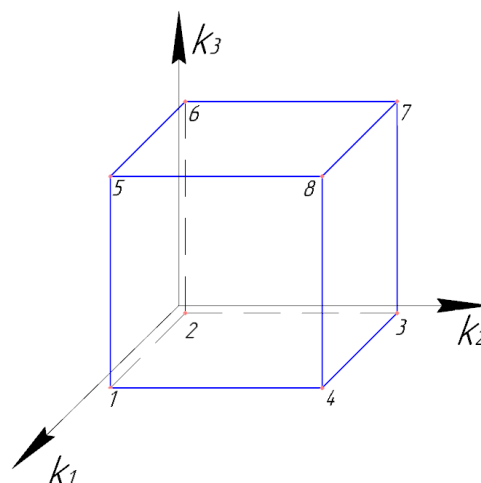


Рисунок 3 – Геометрическая интерпретация полного факторного эксперимента 2^3

Figure 3 – Geometric interpretation of a full factorial experiment 2^3

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные данные будут определять зависимости, скорости коагуляции от критериев k_1, k_2, k_3 и позволят составить уравнение регрессии, необходимое для практических расчетов.

Таким образом, с целью сокращения транспортных выбросов и очистки выхлопных газов автомобиля при минимальных затратах и максимальной эффективности необходимо применение метода ультразвуковой очистки отработавших газов. Согласно проведенному исследованию можно сделать заключение, что ультразвуковое воздействие позволяет усилить явление коагуляции частиц выхлопных газов и способствует их оседанию внутри корпуса ультразвукового стенда в виде нагара.

Благодаря применению метода теории подобия и анализа размерностей были получены три критерия подобия, которые дают нам следующие преимущества:

- во-первых, сократилось число переменных, влияющих на эксперимент;
- во-вторых, на эксперимент будут влиять не отдельные факторы величин, а весь его комплекс в качестве трех критериев подобия, то есть более ясно будут выступать внутренние связи величин;
- в-третьих, на основе полученных критериев подобия было установлено проведение восьми опытов, выбран план многофакторного эксперимента 2^3 и разработана методика экспериментального исследования.

Полученный план эксперимента позволяет определить эффективность применения метода ультразвуковой коагуляции на разработанном стенде и определить скорость оседания частиц отработавших газов автомобиля.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Shamim T. Effect of engine exhaust gas modulation on the cold start emissions *International Journal of Automotive Technology*, 2011, vol. 12 no. 4, pp. 475-487.

2. Kheirbek I., Haney J., Douglas S., Ito K., Matte T. The contribution of motor vehicle emissions to ambient fine particulate matter public health impacts in New York City: A health burden assessment *Environmental Health: A Global Access Science Source*, 2016, vol. 15, no 1, p.89.

3. Вольнов А.С., Третьяк Л.Н., Герасимов Е.М. Новые подходы к очистке отработавших газов двигателей внутреннего сгорания // ВЕСТНИК ОГУ. 2014. №10 (171). С.36–43.

4. Ложкин В.Н., Шульгин В.В., Максимов М.А. О моделировании систем очистки выхлопных газов ДВС с использованием нейтрализаторов фазового преобразования и тепловых аккумуляторов // Журнал «Технико-технологические проблемы сервиса». 2011. №2(16). С.16–22.

5. Ibatov M.K., Aliev S.B., Balabayev O.T., Askarov B.Sh. Main results of experimental studies of open-pit mines diesel locomotive internal combustion [HYPERLINK "https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85072051856&origin=reflist"](https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85072051856&origin=reflist) engine isolation, *Ugol*, 2019, no. 7, pp. 28-30.

6. Gallego-Juárez J.A., Graff K.F. Power [HYPERLINK "https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-84940519069&origin=reflist"](https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-84940519069&origin=reflist) Ultrasonics [HYPERLINK "https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-84940519069&origin=reflist"](https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-84940519069&origin=reflist): Applications of High-Intensity Ultrasound. Cambridge, Woodhead [HYPERLINK "https://pureportal.coventry.ac.uk/en/publications/power-ultrasonics-for-food-processing-2"](https://pureportal.coventry.ac.uk/en/publications/power-ultrasonics-for-food-processing-2) Publishing, 2015. pp. 1-1142.

7. Антонникова А.А., Коровина Н.В., Кудряшова О.Б. Ультразвуковое осаждение мелкодисперсного аэрозоля // Известия Томского политехнического университета. 2014. №2. С. 57–62.

8. Кукешева А.Б. Экспериментальное исследование коагуляции выхлопных газов под действием ультразвука. Республиканская студенческая научная конференция. «Вклад молодежной науки в реализацию Стратегии «Казахстан – 2050». 2019. №1. С. 980–981.

9. Ибатов М.К., Пак И.А. Устройство очистки выхлопных газов. Сагиновские чтения «Интеграция науки, образования и производства – основа реализации Плана нации». 2019. №11. С. 335–336.

10. Кадыров А.С., Пак И.А., Сарсембеков Б.К. Исследование ультразвуковой очистки отработавших газов двигателей внутреннего сгорания. XV Международная научно-практическая конференция «Перспективные вопросы мировой науки». 2019. №13. С. 76–80.

11. Кадыров А.С., Балабаев О.Т., Аскаров Б.Ш., Жашкеев Е.К., Аскарова А.Б. Разработка устройства для изоляции отработавших газов двигателя подземной самоходной машины. Труды Университета. 2020. №1. С. 113–116.

12. 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.

13. Кадыров А.С., Суюмбаев Ш.М., Сарсембеков Б.К. Экспериментальное исследование ультразвукового автомобильного глушителя. Сагиновские чтения. «Интеграция науки, образования и производства – основа реализации Плана нации». 2020. №12. С. 605–607.

14. Пак И.А., Ибатов М.К., Баурова Н.И. Устройство ультразвуковой очистки отработавших газов двигателей внутреннего сгорания транспортной техники. Сагиновские чтения. «Интеграция науки, образования и производства – основа реализации Плана нации». 2020. №12. С. 634–636.

REFERENCES

1. Shamim T. Effect of engine exhaust gas modulation on the cold start emissions *International Journal of Automotive Technology*, 2011; 12(4): 475-487.

2. Kheirbek I., Haney J., Douglas S., Ito K., Matte T. The contribution of motor vehicle emissions to ambient fine particulate matter public health impacts in New York City: A health burden assessment *Environmental Health. A Global Access Science Source*, 2016; 15(1): 89.

3. Vol'nov A.S., Tretyak L.N., Gerasimov E.M. Novye podhody k ochistke otrabotavshih gazov dvigatelej vnutrennego sgoraniya [New approaches to cleaning the exhaust gases of internal combustion engines]. *Vestnik OGU*, 2014; 10 (171): 36-43. (In Russian)

4. Lozhkin V.N., Shul'gin V.V., Maksimov M.A. O modelirovani sistem ochistki vykhlopnih gazov DVS s ispol'zovaniem nejtralizatorov fazovogo preobrazovaniya i teplovyh akkumulyatorov [On modeling exhaust gas cleaning systems for ICE using phase transformation neutralizers and heat accumulators]. *Zhurnal «Tekhniko-tekhnologicheskie problemy servisa»*, 2011; 2(16): 16-22. (In Russian)

5. Ibatov M.K., Aliev S.B., Balabayev O.T., Askarov B.Sh. Main results of experimental studies of open-pit mines diesel locomotive internal combustion engine isolation, *Ugol*, 2019; 7: 28-30.

6. Gallego-Juárez J.A., Graff K.F. Power [HYPERLINK "https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-84940519069&origin=reflist"](https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-84940519069&origin=reflist) Ultrasonics [HYPERLINK "https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-84940519069&origin=reflist"](https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-84940519069&origin=reflist): Applications of High-Intensity Ultrasound. Cambridge, Woodhead [HYPERLINK "https://pureportal.coventry.ac.uk/en/publications/power-ultrasonics-for-food-processing-2"](https://pureportal.coventry.ac.uk/en/publications/power-ultrasonics-for-food-processing-2) Publishing, 2015: 1-1142.

7. Antonnikova A.A., Kopovina N.V., Kudpyashova O.B. Ul'trazvukovoe ocazhdenie melkodicpercn-

go aepozolya [Ultrasonic deposition of fine aerosol]. *Izvestiya Tomskogo politexnicheskogo universiteta*, 2014; 2: 57-62. (In Russian)

8. Kukesheva A.B. Eksperimentalnoye issledovaniye koagulyatsii vykhlopnnykh gazov pod deystviyem ultrazvuka [Experimental study of coagulation of exhaust gases under the influence of ultrasound] *«Vklad molodezhnoy nauki v realizatsiyu Strategii «Kazakhstan - 2050»*, 2019; 1: 980-981. (In Russian)

9. Ibatov M.K., Pak I.A. "Uchtojstvo ochistki vykhlopnnykh gazov" [Exhaust gas cleaning device]. *Saginovskie chteniya «Integratsiya nauki, obpazovaniya i proizvodstva – osnovaya realizatsiya Plana natsii»* 2019; 11: 335-336. (In Russian)

10. Kadyrov A.S., Pak I.A., Sarsembekov B.K. «Issledovanie ul'trazvukovoy ochistki otrabotavshih gazov dvigatelya vnutrennego sgoraniya» [Study of ultrasonic cleaning of exhaust gases from internal combustion engines] *XV Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya «Perspektivnye voprosy tipovoy nauki»*, 2019; 13: 76-80. (In Russian)

11. Kadyrov A.S., Balabaev O.T., Askarov B.Sh., Zhashkeev E.K., Askarova A.B. Razrabotka ustrojstva dlya izolyatsii otrabotavshih gazov dvigatelya podzemnoy samohodnoy mashiny [Development of a device for isolating the exhaust gases of an underground self-propelled machine]. *Trudy Universiteta*, 2020; 1: 113-116. (In Russian)

12. 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 [Results of experimental studies of the operation of capacitive equipment for ultrasonic cleaning of exhaust gases from vehicles]. *Ugol'*, 2020; 2: 73-78. (In Russian)

13. Kadyrov A.S., Suyunbaev Sh.M., Sarsembekov B.K. Eksperimental'noye issledovanie ul'trazvukovogo avtomobil'nogo glushitelya [Experimental study of an ultrasonic automobile muffler]. *Saginovskie chteniya. «Integratsiya nauki, obrazovaniya i proizvodstva – osnovaya realizatsiya Plana natsii»*, 2020; 12, pp. 605-607. (In Russian)

14. Pak I.A., Ibatov M.K., Baurova N.I. Ustrojstva ul'trazvukovoy ochistki otrabotavshih gazov dvigatelya vnutrennego sgoraniya transportnoy tekhniki. [Devices for ultrasonic cleaning of exhaust gases from internal combustion engines of transport equipment]. *Saginovskie chteniya. «Integratsiya nauki, obrazovaniya i proizvodstva – osnovaya realizatsiya Plana natsii»*, 2020; 12: 634-636. (In Russian)

ВКЛАД СОАВТОРОВ

Кадыров А.С. Руководство по исследованию процесса коагуляции под действием ультразвука в экспериментальном стенде для очистки отработавших газов автомобиля. Применение теории подобия в экспериментальном исследовании.

Сарсембеков Б.К. Разработка ультразвукового стенда.

Кукешева А.Б. Составление плана эксперимента по определению скорости оседания частиц

на экспериментальном ультразвуковом стенде с помощью метода теории подобия и анализа размерностей.

AUTHORS' CONTRIBUTION

Adil S. Kadyrov, a guideline on the research of the process of coagulation under the action of ultrasound in an experimental stand for cleaning the exhaust gases of a car, an application of the theory of similarity in experimental research.

Bauyrzhan K.Sarsembekov, the development of an ultrasonic stand.

Alia B.Kukesheva – planning of an experiment to determine the rate of particle subsidence on an experimental hive platform using the method of similarity and dimensional analysis.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Кадыров Адиль Сураатович – д-р техн. наук, проф. кафедры «Транспортная техника и логистические системы» Карагандинский технический университет (100027, Республика Казахстан, г. Караганда, пр. Нурсултана Назарбаева, 56), +7-701-915-09-11, e-mail: ludmila77025@mail.ru, ORCID id – 0000-0001-7071-2300

Сарсембеков Бауыржан Кобланович – магистр техн. наук, докторант кафедры «Транспортная техника и логистические системы», Карагандинский технический университет (100027, Республика Казахстан, г. Караганда, пр. Нурсултана Назарбаева, 56), +7-747-439-05-87, e-mail: baurask@mail.ru, ORCID id - 0000-0002-4815-1823

Кукешева Алия Бакибаевна – магистр техн. наук, ассистент кафедры «Транспортная техника и логистические системы» Карагандинский технический университет (100027, Республика Казахстан, г. Караганда, пр. Нурсултана Назарбаева, 56), +7-702-370-69-08, e-mail: alisska_vip@bk.ru, ORCID id - 0000-0002-3063-5870

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Adil S. Kadyrov, Dr. of Sci., Professor of the Transport equipment and logistics Department, Karagandar Technical University (100027, the Republic of Kazakhstan, Karaganda, N.Nozarbaev Prospekt, 56), +7-701-915-09-11, e-mail: ludmila77025@mail.ru, ORCID id – 0000-0001-7071-2300

Bauyrzhan K.Sarsembekov, Master of Sci., doctoral student of the Transport equipment and logistics Department, (100027, the Republic of Kazakhstan, Karaganda, N.Nozarbaev Prospekt, 56), +7-747-439-05-87, e-mail: baurask@mail.ru, ORCID id - 0000-0002-4815-1823

Alia B.Kukesheva, Master of Sci., Associated professor of the Transport equipment and logistics Department, Karagandar Technical University (100027, the Republic of Kazakhstan, Karaganda, N.Nozarbaev Prospekt, 56), +7-702-370-69-08, e-mail: alisska_vip@bk.ru, ORCID id - 0000-0002-3063-5870