

# Анализ процесса коагуляции выхлопных газов в глушителе автомобиля

**САХАПОВ Рустэм Лукманович**, д.т.н., зав. кафедрой, [rusakharov@gmail.com](mailto:rusakharov@gmail.com), Казанский (Приволжский) федеральный университет, ул. Кремлевская, 18, Казань, Татарстан, Россия.

**Аннотация.** Проведён анализ зависимостей, описывающих процесс коагуляции частиц в выхлопных газах автомобиля. Рассмотрены два основных механизма коагуляции: естественное броуновское движение частиц и воздействие активной силы ультразвукового излучения. Особое внимание уделено влиянию ультразвука на эффективность агрегации сажевых частиц в глушителе, что позволяет существенно повысить качество очистки от твёрдых загрязнителей. Для количественного описания процесса предложено использовать формулу степени коагуляции профессора А. С. Кадырова, учитывающую динамические характеристики и вязкие свойства среды. Проведён анализ различных моделей коагуляции, подтверждающий преимущество выбранной зависимости с точки зрения точности и адекватности описания процесса. Результаты исследования могут быть применены при разработке новых эффективных ультразвуковых глушителей и систем очистки выхлопных газов, способствуя снижению загрязнения атмосферы и улучшению экологической безопасности автомобильного транспорта.

**Ключевые слова:** автомобиль, глушитель, ультразвук, броуновское движение, коагуляции.

## Введение

Загрязнение воздуха при работе двигателей внутреннего сгорания является экологической проблемой. Очистка выхлопных газов осуществляется в основном катализаторами. Однако этот метод дорог, а сами катализаторы недолговечны.

В настоящее время приводится ряд теоретических экспериментальных исследований по применению для очистки выхлопных газов в глушителе за счет размещения в нем ультразвукового излучателя [1].

Исследователями получены значимые практические и теоретические результаты. Однако остается нерешенным вопрос степени осаждения частиц с друг другом, то есть коэффициента диффузии.

Целью исследования является анализ существующих результатов и установление корректного для описываемого случая коэффициента диффузии.

В связи со сложностью математического описания процесса необходимо изучить различные подходы к решению этой задачи. Особенности очистки газов в предлагаемом устройстве заключаются в следующем:

- замкнутый объем глушителя;
- движение газов от коллектора к выходному соплу со скоростью с ожидаемым чис-

лом оборотов двигателя;

- воздействие нескольких ультразвуковых излучателей.

Физический процесс, происходящий в глушителе, описывается коагуляцией частиц газа. Собственная коагуляция достаточно хорошо описана в первом разделе диссертации И.А. Пака [2]. Но возникает вопрос о методе математического описания этого процесса.

## Методы исследования

Кинетика коагуляции мелких сферических частиц, объединяющихся в более крупные, разработаны польским ученым М. Смолуховским. Он предложил, что общее количество частиц при столкновении уменьшается, то есть происходит процесс коагуляции, и предложил описывать этот процесс зависимостью [3]:

$$-\frac{dn}{dt} = 2\pi D S n^2, \quad (1)$$

где  $n$  – количество частиц,

$D$  – коэффициент диффузии,

$S$  – средний радиус притяжения частиц.

Как установил А. Эйнштейн, коэффициент диффузии двух сталкивающихся частиц равен массе вещества, которое диффундирует в единицу времени через единицу площади

при коэффициенте концентрации, равном 1 [4].

Исходя из предположения, что величины радиусов и среды диффузии коагулирующих частиц равны и интегрируя (1) с учетом коэффициента диффузии, получаем зависимость, которая описывает, как изменяется концентрация взвешенных частиц в жидкости под действием броуновской диффузии [5].

Эта формула применима к системе, в которой частицы начинают распространяться из области с начальной концентрацией  $n_0$ , и с течением времени концентрация  $n(t)$  уменьшается за счёт их диффузионного перераспределения.

Это уравнение является прорывом в теории коагуляции, однако не учитывает:

- а) замкнутый объем глушителя;
- б) давление со стороны коллектора;
- в) действие ультразвуковых генераторов.

Кинетику коагуляции аэрозолей в упрощённом виде возможно описывать с помощью экспоненциальной зависимости. В этом случае концентрация частиц в системе изменяется по следующему закону: текущая концентрация частиц  $n$  равна начальной концентрации  $n_0$ , умноженной на экспоненту с отрицательным коэффициентом  $k$  и временем  $t$  [6].

Коэффициент  $k$  при этом отражает скорость коагуляции: чем он больше, тем быстрее происходит объединение частиц.

И.А. Пак провел исследования по утилизации выхлопных газов двигателей внутреннего сгорания в замкнутой емкости (рисунок 1).

Рассматривался цилиндр, заполненный выхлопным газом, на котором вертикально вниз действует ультразвуковая волна.

При работе ультразвукового  $t > 0$ ;  $P = \text{const}$ ;  $P = \tilde{P}(\rho, m)$ ;  $m = \tilde{m}(t)$ , где  $V$  – объем емкости;

$P$  – давление внутри емкости;

$\rho$  – плотность газа;

$m$  – масса газа в емкости.

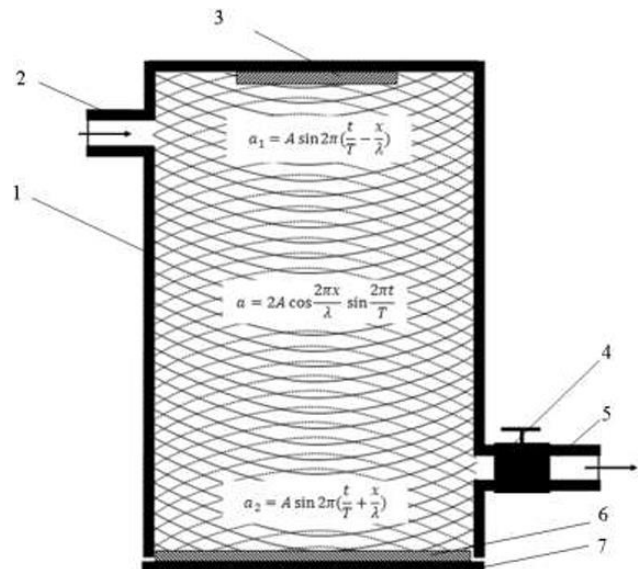
Предполагая, что средняя концентрация молекул газа и сажи пропорциональна их массам, то общая масса веществ ( $m_o$ ) в емкости будет равна сумме масс газа ( $m_r$ ) и сажи ( $m_c$ ):

$$m_o = nm_c + (1 + n)m_r. \quad (2)$$

Учитывая экспоненциальную зависимость кинетики коагуляции аэрозолей, получена следующая модель, описывающая изменение массы частиц во времени [7]:

$$m_o - m_o e^{-kt} (1 - e^{-kt}). \quad (3)$$

Получено:



1 – накопительная емкость; 2 – впускной патрубок; 3 – ультразвуковой генератор; 4 – перепускной клапан; 5 – выпускной патрубок; 6 – отражатель звуковых волн; 7 – поддон

**Рисунок 1 – Устройство для ультразвуковой очистки отработавших газов**

$$k = \frac{\ln \frac{n}{n_0}}{t},$$

поставив получено:

$$m_c = m_o \left( 1 - e^{\frac{\ln \frac{n}{n_0}}{t}} \right) = m_o \left( 1 - \frac{n}{n_0} \right). \quad (4)$$

Как видно из формулы (4) масса осаждаемой сажи находится в прямой пропорциональной зависимости от  $m_o$ , а также зависит от соотношения  $\frac{n}{n_0}$ , определяющего коэффициент коагуляции.

Полученную зависимость И.А. Пак подтвердил экспериментом, измеряя степень прозрачности газа до воздействия и после воздействия ультразвука [8].

Зависимость (4) дает возможность описать динамику образования сажи и её связь с массой исходного газа и состоянием процесса.

Недостатком является то, что они корректны только для замкнутой емкости.

Движение газа исследовано Р. Кенигом [9]. Он определил степень очистки частицы в звуковых колебаниях – коэффициент увлечения. При определении этой величины было рассмотрено движение частицы радиуса  $\tau$  и плотности  $\rho$ , движущейся с вязкостью  $\eta$ , колеблющейся с амплитудой  $X$  и частотой  $S$ .

На частицу действует сила Стокса [10].

Движение частицы было описано дифференциальными уравнениями:

$$m \frac{d^2 X_p}{dt^2} = 6\pi\eta r \left[ 2\pi f X_G (\cos 2\pi f t) - \frac{dX_p}{dt} \right], \quad (5)$$

где  $X_p$  – амплитуда колебаний частиц.

В результате решения было получено соотношение  $X_p$  и  $X_G$ , определяющее степень участия частицы в колебаниях и, следовательно, возможной коагуляции [11]:

$$X_p = \frac{X_G}{\sqrt{\frac{4\pi\rho r^2 f}{9\eta^2 + 1}}}. \quad (6)$$

Упрощая выражение и введя корректные допущения, Кениг получил величину коэффициента увлечения [9]:

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

На наш взгляд, коэффициент увлечения является вероятностью коагуляции.

Достоинством приведённых Кенигом исследований является то, что впервые рассмотрены движущиеся частицы под действием активной силы ультразвука.

Недостатком по отношению к нашей задаче является отсутствие активной силы давления на газ дополнительно к ультразвуку (давление со стороны коллектора двигателя). Не учитывается, что процесс происходит в замкнутом объеме.

Достоинством полученной зависимости является то, что полученный безразмерный коэффициент увлечения учитывает вероятность коагуляции от воздействия ультразву-

ка.

В связи необходимостью их учета рассмотрим безразмерный коэффициент, учитывающий величину коагуляции в зависимости от скорости движения газа от коллектора по выхлопной трубе.

Профессором А.С. Кадыровым исследован процесс движения частицы сажи по выхлопной трубе [12]. Рассмотрено уравнение движения под действием сил давления со стороны двигателя, силы Стокса [12] и давления от излучателя ультразвуковых волн получен безразмерный коэффициент.

$$K = \frac{\tau\rho V}{6\eta}. \quad (8)$$

Необходимо отметить, что коэффициенты по зависимостям (7) и (8) по своей физической сущности являются отношением инерционных сил к силам вязкости и близки к критерию Рейнольдса.

Таким образом, в математической модели предлагается использовать в качестве граничных условий (7) и существование процесса (8) полученного коэффициента.

#### Заключение

Анализ зависимостей, описывающих процесс коагуляции, показал, что наиболее адекватная зависимость для описания процесса работы ультразвукового глушителя получена А.С. Кадыровым.

Ценность этой формулы заключается в учете отношения динамической составляющей процесса  $\tau\rho V$  к вязкой  $6\eta$ . По своей физической сути предложенный коэффициент близок к критерию Рейнольдса.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kadyrov Adil; Sarsembekov, Bauyrzha, Kukesheva, Aliya; Sinelnikov, Kirill. Application of electric pulse and ultrasonic mufflers for increasing the degree of exhaust gas purification in car engines. 2025, 8(1), pp. 33-40.
2. Пак И.А. Разработка методики расчета и конструкции устройства для утилизации отработавших газов городских автобусов: Дис. ... д-ра философии (PhD). – Караганда.: КарТУ, 2021. – 138 с.
3. Эйнштейн А., Смолуховский М. Броуновское движение. ОНТИ / Главная редакция общетехнической литературы. М., 1936. – 607 с.
4. Эйнштейн А. К теории броуновского движения // Эйнштейн А. Собр. соч. – М.: Наука, 1966. – Т. 3. – С. 118-127.
5. Xie M., He Q. Solution of Smoluchowski coagulation equation for Brownian motion with TEMOM // Particuology. – 2022. – Vol. 70. – Pp. 64-71.
6. Pak I., Kadyrov A., Askarov B., Suleyev B., Karsakova A. Developing and studying the method of ultrasonic purification and utilization of internal combustion engine exhaust gases. Communications – Scientific Letters of the University of Žilina, 2023, 25(3), pp. B245–B258.
7. Kadyrov A., Ganyukov A., Pak I., Suleyev B., Balabekova K. Theoretical and experimental study of operation of the tank equipment for ultrasonic purification of the internal combustion engine exhaust gases. Communications – Scientific Letters of the University of Žilina, 2021, 23(3), pp. B219–B226.

8. Pak I. Experimental study of the ultrasonic muffler efficiency for improving the exhaust gas cleaning system of internal combustion engines of automobiles. *Material and Mechanical Engineering Technology*, 2024, 2024(2), pp. 53–63.
9. Бергман Л. Ультразвук и его применение в науке и технике / Л. Бергман; Пер. с нем. В.С. Григорьева и Л.Д. Розенберга. – М.: Издательство иностранной литературы, 1957. – 726 с.
10. Kadyrov A., Bembenek M., Sarsembekov B., Kukeshova A., Nurkushova S. The Influence of the Frequency of Ultrasound on the Exhaust Gas Purification Process in a Diesel Car Muffler. *Applied Sciences (Switzerland)*, 2024, 14(12), 5027.
11. Ibatov M.K., Kadyrov A.S., Pak I.A., Kadyrova I.A., Askarov B.S. The results of experimental studies of the capacitive equipment of ultrasonic cleaning of exhaust gases of vehicles. *Ugol*, 2020, (2), pp. 73–78.
12. Kadyrov A., Sinelnikov K., Sakhapov R., Kurmasheva, B., Suyunbaev, S. Studying the process of transport equipment cooling system ultrasonic cleaning. *Communications – Scientific Letters of the University of Žilina*, 2022, 24(4), pp. B288–B300.

### **Автомобиль бәсеңдеткішінде пайдаланылған газдарды коагуляциялау үрдісін талдау**

**САХАПОВ Рустэм Лукманович**, т.ғ.д., кафедра меңгерушісі, [rusakhapov@gmail.com](mailto:rusakhapov@gmail.com), Қазан (Еділ) федералды университеті, Кремлевская көшесі, 18, Қазан, Татарстан, Ресей.

**Аңдатпа.** Жұмыста автомобильдің пайдаланылған газдарындағы бөлшектердің коагуляциясы үрдісін сипаттайтын тәуелділіктерге талдау жүргізілді. Коагуляцияның екі негізгі тетігі қаралды: бөлшектердің табиғи Броун қозғалысы және ультрадыбыстық сәулеленудің белсенді күшінің әсері. Ультрадыбыстың бәсеңдеткіштің күйе бөлшектерінің агрегациясының тиімділігіне әсеріне ерекше назар аударылады, бұл қатты ластағыштардан тазарту сапасын едәуір арттыруға мүмкіндік береді. Үрдісті сандық сипаттау үшін профессор А.С.Қадыровтың ортаның серпінді сипаттамалары мен тұтқыр қасиеттерін ескеретін коагуляция дәрежесінің формуласын пайдалану ұсынылды. Үрдісті сипаттаудың дәлдігі мен барабарлығы тұрғысынан таңдалған тәуелділіктің артықшылығын растайтын коагуляцияның әртүрлі үлгілеріне талдау жүргізілді. Зерттеу нәтижелері атмосфераның ластануын төмендетуге және автомобиль көлігінің экологиялық қауіпсіздігін жақсартуға ықпал ете отырып, жаңа тиімді ультрадыбыстық бәсеңдеткіштерді және пайдаланылған газдарды тазарту жүйелерін әзірлеу кезінде қолданылуы мүмкін.

**Кілт сөздер:** автомобиль, бәсеңдеткіш, ультрадыбыс, Броун қозғалысы, коагуляция.

### **Analysis of Exhaust Gas Coagulation Process in Vehicle Silencer**

**SAKHAPOV Rustem**, Dr. of Tech. Sc., Head of Department, [rusakhapov@gmail.com](mailto:rusakhapov@gmail.com), Kazan (Volga) Federal University, Kremlevskaya Street, 18, Kazan, Tatarstan, Russia.

**Abstract.** An analysis of the relationships describing the process of coagulation of particles in the exhaust gases of the car was conducted. Two main mechanisms of coagulation are considered: the natural Brown movement of particles and the effect of the active force of ultrasonic radiation. Particular attention is paid to the effect of ultrasound on the efficiency of aggregation of particulate matter in a silencer, which can significantly improve the quality of cleaning from solid pollutants. For quantitative description of the process, it is proposed to use the coagulation degree formula of Professor A. S. Kadyrov, taking into account the dynamic characteristics and viscous properties of the medium. Various models of coagulation were analyzed, confirming the advantage of the selected dependence in terms of accuracy and adequacy of the process description. The results of the study can be applied in the development of new effective ultrasonic silencers and exhaust gas purification systems, helping to reduce atmospheric pollution and improve the environmental safety of road transport.

**Keywords:** car, muffler, ultrasound, Brownian movements, coagulation.

## REFERENCES

1. Kadyrov Adil, Sarsembekov Bauyrzhan, Kukesheva Aliya; Sinelnikov Kirill. Application of electric pulse and ultrasonic mufflers for increasing the degree of exhaust gas purification in car engines. 2025, no. 8(1), pp. 33-40.
2. Pak I.A. Razrabotka metodiki rascheta i konstrukcii ustrojstva dlya utilizacii otrabotavshih gazov gorodskih avtobusov. Dis. ... d-ra filosofii PhD. [Razrabotka metodiki rascheta i konstrukcii ustrojstva dlya utilizacii otrabotavshih gazov gorodskih avtobusov. Dis. ... d-ra filosofii (PhD)]. Karaganda.: KarTU, 2021. 138 p.
3. Ejnshtejn A., Smoluhovskij M. Brounovskoe dvizhenie. ONTI / Glavnaya redakciya obshchetekhnicheskoy literatury. Moscow, 1936. – 607 p.
4. Ejnshtejn A. K teorii brounovskogo dvizheniya // Ejnshtejn A. Sobr. soch. – Moscow: Nauka, 1966. – T. 3. – Pp. 118-127.
5. Xie M., He Q. Solution of Smoluchowski coagulation equation for Brownian motion with TEMOM // Particuology. – 2022. – Vol. 70. – Pp. 64-71.
6. Pak I., Kadyrov A., Askarov B., Suleyev B., Karsakova A. Developing and studying the method of ultrasonic purification and utilization of internal combustion engine exhaust gases. Communications – Scientific Letters of the University of Žilina, 2023, 25(3), pp. B245–B258.
7. Kadyrov A., Ganyukov A., Pak I., Suleyev B., Balabekova K. Theoretical and experimental study of operation of the tank equipment for ultrasonic purification of the internal combustion engine exhaust gases. Communications – Scientific Letters of the University of Žilina, 2021, 23(3), pp. B219–B226.
8. Pak I. Experimental study of the ultrasonic muffler efficiency for improving the exhaust gas cleaning system of internal combustion engines of automobiles. Material and Mechanical Engineering Technology, 2024, 2024(2), pp. 53-63.
9. Bergman L. Ul'trazvuk i ego primenenie v nauke i tekhnike / L. Bergman; Per. s nem. V.S. Grigor'eva i L.D. Rozenberga. – M.: Izdatel'stvo inostrannoj literatury, 1957. – 726 p.
10. Kadyrov A., Bembenek M., Sarsembekov B., Kukesheva A., Nurkusheva S. The Influence of the Frequency of Ultrasound on the Exhaust Gas Purification Process in a Diesel Car Muffler. Applied Sciences (Switzerland), 2024, 14(12), 5027.
11. Ibatov M.K., Kadyrov A.S., Pak I.A., Kadyrova I.A., Askarov B.S. The results of experimental studies of the capacitive equipment of ultrasonic cleaning of exhaust gases of vehicles. Ugol, 2020, (2), pp. 73–78.
12. Kadyrov A., Sinelnikov K., Sakhapov R., Kurmasheva, B., Suyunbaev, S. Studying the process of transport equipment cooling system ultrasonic cleaning. Communications – Scientific Letters of the University of Žilina. 2022, no. 24, Vol.4, pp. B288 – B300.