

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ ФОРСУНКИ В СИСТЕМАХ СЕЛЕКТИВНОГО КАТАЛИТИЧЕСКОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ**М.В. Аскерко**

askerko99@mail.ru

SPIN-код: 9344-4488

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Аннотация

На фоне непрерывного увеличения автомобильного парка проблема выбросов в атмосферу вредных веществ, поступающих с отработавшими газами, продолжает оставаться одной из наиболее актуальных. Для ее решения было разработано множество методов и средств, в числе которых различные системы постобработки выхлопных газов. В данной работе рассмотрены системы избирательной каталитической нейтрализации, принцип действия и основные факторы, влияющие на их эффективность. Особое внимание уделено вопросу испарения реагента, впрыскиваемого в выпускной тракт. Разработана математическая модель, позволяющая в первом приближении определять местоположение форсунки, обеспечивающее полное испарение реагента до входа в блок катализатора. На основании предложенной методики выполнен соответствующий расчет для перспективного дизельного двигателя.

Ключевые слова

Поршневой двигатель, дизельный двигатель, отработавшие газы, системы обработки выхлопных газов, оксиды азота, впрыск мочевины, термическое разложение, система SCR

Поступила в редакцию 17.01.2019

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2019

Введение. Проблема выбросов в атмосферу вредных веществ является актуальной на протяжении последних десятилетий. Ухудшение экологической обстановки обусловлено многими факторами, в частности постоянным развитием автомобильного парка.

Основную угрозу для здоровья человека и окружающей среды представляют: оксиды углерода, углеводороды, летучие органические вещества, оксиды азота и взвешенные частицы. Поэтому были приняты нормативы, ограничивающие их предельно допустимые концентрации в составе отработавших газов (ОГ). При этом наибольшую опасность представляют оксиды азота, которые примерно в 10 раз более токсичны, чем угарный газ [1].

Для соблюдения данных нормативов разработано множество методов снижения токсичности ОГ двигателей внутреннего сгорания (ДВС). Условно их можно подразделить на две группы: методы, осуществляемые внутри цилиндра двигателя, и применение систем очистки ОГ [2].

К первой группе относятся технические решения, ориентированные на совершенствование процессов смесеобразования и сгорания [3]. Среди них: ре-

циркуляция ОГ, регулировка фаз газораспределения, реализация цикла Миллера, применение катализаторов горения топлива, работа на бедных смесях и др.

Ко второй группе относятся: каталитические нейтрализаторы, поглощение вредных веществ жидкостью, сажевые фильтры, термические катализаторы, системы избирательного каталитического восстановления (SCR) и др.

Учитывая современные экологические требования, предъявляемые к составу ОГ транспортных дизелей, достичь приемлемых эффективных и экологических показателей работы ДВС лишь в результате оптимизации рабочего процесса весьма затруднительно. Поэтому неотъемлемой составляющей современных дизельных силовых установок являются различные системы очистки ОГ [4].

В настоящий момент для дизельных двигателей наибольшее распространение приобрели системы SCR. Это обусловлено их высокой эффективностью и вариативностью компонентного состава для нейтрализации тех или иных химических соединений [4].

Технология SCR. Система избирательной каталитической нейтрализации способствует восстановлению оксидов азота (NO_x) до свободного азота N_2 и воды H_2O в блоке катализатора при наличии соответствующего реагента — аммиака (NH_3). В транспортной отрасли в роли источника NH_3 выступает 32,5 %-ный водный раствор карбамида ($\text{CO}(\text{NH}_2)_2$).

Типовая схема системы SCR представлена на рис. 1. Раствор мочевины впрыскивается в отработавшие газы перед их поступлением в блок каталитического нейтрализатора. Под воздействием высокой температуры ОГ происходит процесс испарения и декомпозиции раствора с образованием аммиака, который условно может быть представлен следующим образом: испарение воды, испарение мочевины, термолиз мочевины, гидролиз изоциановой кислоты [5].

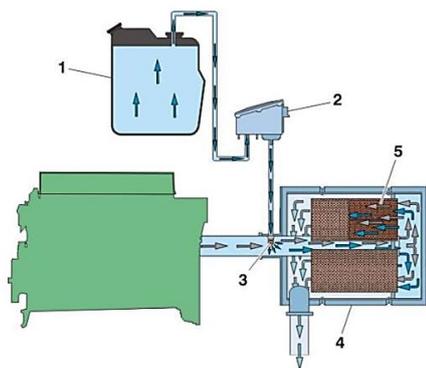


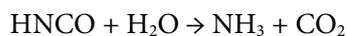
Рис.1. Система очистки ОГ с технологией SCR:

1 — бак мочевины; 2 — насосный блок; 3 — блок дозирования; 4 — глушитель со встроенным каталитическим нейтрализатором SCR 5

В результате реакции термолиза мочевины распадается на аммиак и изоциановую кислоту. Химическая реакция протекает при температурах свыше $200\text{ }^\circ\text{C}$ [6]:

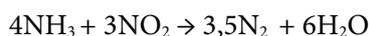
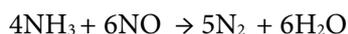


В процессе последующей реакции гидролиза изоциановая кислота взаимодействует с содержащимися в ОГ парами воды. В результате образуются молекулы аммиака и углекислого газа [6]:



В блоке катализатора оксиды азота и аммиак вступают в реакцию с выделением свободного азота и воды.

Ниже приведены четыре основные реакции, которые протекают в катализаторе SCR и способствуют нейтрализации оксидов азота [6]:



Принимая во внимание тот факт, что обычно 90 % оксидов азота NO_x в выхлопных газах дизелей составляют NO , говорят, что реакция (2) является наиболее значимой в SCR [7].

В соответствии с уравнением химической реакции (3), соотношение концентрации аммиака и оксидов азота на входе в катализатор должно быть приблизительно 1 : 1. Поскольку оксиды азота равномерно перемешаны в ОГ, важным фактором является равномерность распределения аммиака на входе катализатор [8]. Данный параметр определяет эффективность процесса восстановления, степень нейтрализации оксидов азота в зависимости от расхода реагента. Увеличение равномерности распределения NH_3 на входе в катализатор обеспечивает необходимую степень нейтрализации оксидов азота при меньшем потреблении реагента [9].

Одним из ключевых факторов при проектировании систем SCR является расстояние между катализатором и форсункой. Оно определяет время, отведенное на протекание химических реакций процесса разложения мочевины и перемешивание аммиака с ОГ [10]. Минимальное значение этого расстояния в первом приближении можно определить исходя из условия полного испарения впрыскиваемого водного раствора мочевины до входа в катализатор.

Предлагаемая процедура расчета состоит из следующих этапов: определение среднего диаметра капель впрыскиваемого раствора, расчет времени их испарения, протекания химических реакций (в первом приближении реакции термолиза (1)), определение искомого расстояния из условия равенства скоростей впрыскиваемых капель и основного потока в системе выпуска ОГ двигателя, пренебрегая релаксацией скорости.

Определение среднего диаметра капель впрыскиваемого раствора на выходе из форсунки. Для определения среднего диаметра капель впрыскиваемого раствора рассмотрим процесс распада струи. Внутренние возмущения, вносимые в поток самим каналом, и внешние, возникающие со стороны среды (прежде всего пульсации давления и турбулентность), обуславливают деформацию поверхности струи, ее неустойчивое движение и распад. Далее происходит вторичное дробление капель, где основным возмущающим фактором является сила

аэродинамического сопротивления среды [11]. В представленных расчетах данное явление не учитывается.

В данной работе впрыск мочевины осуществляется через соответствующую форсунку, используемую в системе SCR двигателя ЯМЗ 6566. Диаметр ее соплового отверстия $D = 0,9$ мм, коэффициент расхода принимают равным 0,75 [12]. Также известными величинами являются давление и температура в канале (сечение $l-l$) и на выходе (сечение $m-m$) из форсунки (рис. 2).

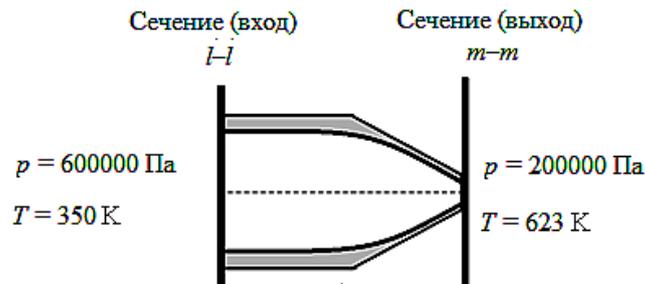


Рис. 2. Эскиз расчетной области форсунки

Плотность потока в обоих сечениях определяется в соответствии с уравнением Менделеева — Клапейрона

$$\rho = \frac{pM}{RT},$$

где p — давление; T — температура; M — молярная масса; R — универсальная газовая постоянная, равная 8,31 Дж/(моль · К).

В результате расчета получаем плотность на входе

$$\rho_{\text{вх}} = 5,776 \text{ кг/м}^3,$$

на выходе

$$\rho_{\text{вых}} = 1,082 \text{ кг/м}^3.$$

В минимальном сечении форсунки скорость потока определяют в соответствии с уравнением Бернулли для одномерного энергоизолированного изоэнтропного стационарного потока газа, пренебрегая потерями всех видов и теплообменом со стенками [13]:

$$\frac{k}{k-1} \frac{p_{\text{вых}}}{\rho_{\text{вых}}} + \frac{\omega^2}{2} = \frac{k}{k-1} \frac{p_{\text{вх}}}{\rho_{\text{вх}}},$$

где $p_{\text{вх}}$ — давление на входе; $p_{\text{вых}}$ — давление на выходе.

Для расчета действительной скорости потока u на выходе из форсунки воспользуемся следующим выражением [13]:

$$u = a_{\text{кр}} \lambda,$$

где местная скорость звука $a_{\text{кр}}$ и приведенная скорость λ равны соответственно

$$a_{кр} = \sqrt{\frac{2k}{k+1} \frac{R}{0,028 \text{ кг/моль}} T_{вх}};$$

$$a_{кр} = 348,12 \text{ м/с};$$

$$\lambda = \sqrt{\frac{k+1}{k-1} \left(1 - \left(\frac{p_{вых}}{p_{вх}} \right) \right)^{\frac{k-1}{k}}}.$$

$$\lambda = 2,312,$$

Здесь k — показатель адиабаты; $T_{вх}$ — температура на входе.

Поскольку полученное значение $\lambda > 1$, имеет место критический режим истечения. Принимаем $\lambda = 1$. В этом случае действительная скорость потока на выходе из форсунки

$$u = 348,12 \text{ м/с}.$$

Средний диаметр впрыскиваемых капель рассчитывают по полуэмпирической формуле А.С. Лышевского [11]:

$$a_{32} = 1,44 D Oh^{0,1466} \left[\left(\frac{\rho_{вых}}{\rho_{в}} \right) We \right]^{-0,266},$$

где $\rho_{в}$ — плотность воды;

число Онезорге Oh [14]

$$Oh = \frac{\mu}{\sqrt{\sigma \rho D}};$$

число Вебера We [14]

$$We = u^2 D \frac{\rho}{\sigma}.$$

Вязкость воды μ и ее поверхностное натяжение σ при заданной температуре 350 К определяют по табличным данным [15]:

$$\mu = 350,9 \cdot 10^{-6} \text{ Па} \cdot \text{с};$$

$$\sigma = 62,69 \cdot 10^{-3} \text{ Н/м}.$$

В этом случае средний диаметр капель на выходе из форсунки

$$a_{32} = 67,14 \text{ мкм}.$$

Расчет времени испарения капли водного раствора мочевины. Компонентный состав водного раствора мочевины, который зачастую используется на практике в системах SCR (известен под маркой AdBlue[®]), содержит 32,5 %

$\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ и 67,5 % H_2O . Будем считать, что процесс испарения капли протекает в два этапа: испарение воды, мгновенная сублимация оставшейся мочевины.

Время испарения τ капли определим в соответствии с законом Срезневского [11]:

$$\tau = \frac{a_{к0}^2 - a_{кт}^2}{C}, \quad (4)$$

где $a_{к0} = a_{32}$ — средний диаметр капли.

В этом случае, поскольку испаряется лишь 67,5 % объема капли, диаметр капли после испарения $a_{кт} = a_{к0} \sqrt[3]{0,325}$. Концентрацию C вычисляют по следующей формуле [11]:

$$C = \frac{8D_{p0}}{\rho_{в}} \frac{T_{к}}{273} \frac{1}{p_{\text{вых}}} p_s(T_{к}),$$

где D_{p0} — коэффициент диффузии при атмосферном давлении и температуре $T = 293$ К; p_s — давление насыщенных паров.

Неизвестную температуру испарения $T_{к}$ определяют из уравнения теплового баланса для капли реагента, пренебрегая релаксацией скорости и температуры [11]:

$$\text{Nu} \lambda(T_{в} - T_{к}) = \text{Sh} D_p h p_s(T_{к}), \quad (5)$$

где $T_{в}$ — температура на выходе.

Энтальпия парообразования [16]

$$h(T_{к}) = 2810050 - 220,225T_{к} - 3,39409T_{к}^2.$$

Давление насыщенных паров [16]

$$p_s(T_{к}) = 1000 \exp(-7,342973 \ln(T_{к}) - 7276,391 \frac{1}{T_{к}} + 67,02455 + 0,4161914 \cdot 10^{-5} T_{к}^2).$$

Коэффициент диффузии [16]

$$D_p(T_{к}) = 0,22 \cdot 10^{-4} \frac{1,013 \cdot 10^5}{p_s(T_{к})} \left(\frac{T_{к}}{273} \right)^{1,75}.$$

Коэффициент теплопроводности среды

$$\lambda(T_{к}) = 0,03.$$

На основе подобия процессов тепло- и массообмена принимаем число Нуссельта $\text{Nu} = 2$, число Шервуда $\text{Sh} = 2$.

В этом случае уравнение (5) примет вид

$$\lambda(T_{к})(T_{в} - T_{к}) = D_p(T_{к}) h(T_{к})(p_s(T_{к}) - p_{\text{вых}}).$$

Для определения искомой величины T_k воспользуемся графическим методом (рис. 3). Введем функцию

$$f(T_k) = \lambda(T_k)(T_v - T_k) - D_p(T_k)h(T_k)(p_s(T_k) - p_{\text{вых}}). \quad (6)$$

Искомое значение параметра лежит на пересечении графика функции $f(T_k)$ с осью абсцисс, следовательно, $T_k = 393,3$ К.

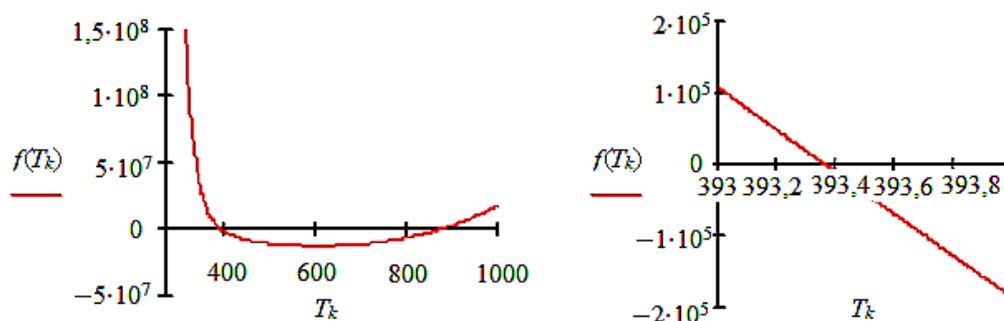


Рис. 3. График функции $f(T_k)$ (6) для определения ее нулей

Таким образом, в соответствии с уравнением (4), время, за которое испарится вода из капли, составляет $\tau = 6,021 \cdot 10^{-3}$ с.

Расчет времени протекания химических реакций. Время протекания реакции τ_p термоллиза (1) определяют в соответствии с уравнением химической кинетики [17]:

$$\frac{d[C]}{d\tau_p} = k[C]. \quad (7)$$

Поскольку данная реакция имеет первый порядок, существует аналитическое решение уравнения (7):

$$\tau_p = \frac{-\ln(C_1/C_0)}{k}. \quad (8)$$

Выражение для константы скорости реакции k записывают следующим образом [18]:

$$k = 4,9 \cdot 10^3 \exp\left(-\frac{5505}{RT_v}\right),$$

где температура $T_v = 350$ °С.

Учитывая, что подлогарифмическое выражение (8) не может равняться нулю, примем $C_1/C_0 = 0,0001$, полагая, что доля исходных веществ, не вступивших в реакцию составляет 0,01 % C_0 .

Таким образом, после подстановки приведенных значений в уравнение (8) получим, что время протекания реакции термоллиза составляет $\tau_p = 5,443 \cdot 10^{-3}$ с.

Расчет минимального расстояния между форсункой и блоком катализатора SCR. Суммарное время $\tau_{\text{общ}}$ испарения водного раствора и разложения мочевины составляет

$$\tau_{\text{общ}} = \tau + \tau_p = 0,011 \text{ с.}$$

Полагая, что скорость впрыскиваемых капель и основного потока ОГ равны, минимальное значение расстояния l между форсункой и блоком катализатора SCR, обеспечивающее завершение рассматриваемых физико-химических процессов, можно определить по следующей формуле:

$$l = v\tau_{\text{общ}} = 50 \cdot 0,011 = 0,573 \text{ м,}$$

где v — скорость потока ОГ.

Выводы. В работе выполнено моделирование распада, испарения и термоллиза одиночной капли водного раствора мочевины в системе обработки выпускных газов перспективного двигателя. Расчетным путем получено, что минимальное расстояние, необходимое для испарения и распада мочевины от форсунки до каталитического блока, должно составлять 573 мм. При этом период испарения капли составил $6,021 \cdot 10^{-3}$ с, а время протекания химической реакции термоллиза — $5,443 \cdot 10^{-3}$ с.

Предлагаемую математическую модель можно использовать на начальных этапах проектирования систем SCR для широкого класса двигателей, позволяя в первом приближении определять минимальное расстояние от форсунки до блока катализатора.

Литература

- [1] Фролов С.Г., Росляков А.Д. Уменьшение вредных выбросов транспортных дизелей путем нейтрализации оксидов азота. *Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета*, 2009, № 3-2(19), с. 138–142.
- [2] Марков В.А., Баширов Р.М., Габитов И.И. Токсичность отработавших газов дизелей. М., Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002.
- [3] Маластовский Н.С., Барченко Ф.Б., Грехов Л.В. и др. Формирование требований к характеристике впрыскивания высокооборотного дизеля в целях снижения токсичности. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2017, № 3. DOI: 10.18698/2308-6033-2017-3-1594 URL: <http://engjournal.ru/catalog/pmce/he/1594.html>
- [4] Johnson T., Joshi A. Review of vehicle engine efficiency and emissions. *SAE Int. J. Engines*, 2018, vol. 11, no. 6, pp. 1307–1330. DOI: 10.4271/2018-01-0329 URL: <https://www.sae.org/publications/technical-papers/content/2018-01-0329/>
- [5] Birkhold F., Meingast U., Wassermann P., et al. Modeling and simulation of the injection of urea-water-solution for automotive SCR DeNOx-systems. *Appl. Catal. B Environ.*, 2007, vol. 70, no. 1-4, pp. 119–127. DOI: 10.1016/j.apcatb.2005.12.035 URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926337306002402>
- [6] Система нейтрализации отработавших газов Selective Catalytic Reduction. *help4auto.com*: веб-сайт. URL: http://www.help4auto.com/download/ssp/424_Sistema_nejtralizacii_OG_SCR.pdf (дата обращения: 12.12.2018).

- [7] Koebel M., Elsener M., Kleemann M. Urea-SCR: a promising technique to reduce NO_x emissions from automotive diesel engines. *Catal. Today*, 2000, vol. 59, no. 3-4, pp. 335–345.
DOI: 10.1016/S0920-5861(00)00299-6
URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0920586100002996>
- [8] Марков В.А., Мягков Л.Л., Маластовский Н.С. и др. Использование мочевины в системах обработки выпускных газов поршневых двигателей. *Безопасность в техносфере*, 2017, т. 6, № 4, с. 40–49.
- [9] Twigg M.V. Urea-SCR technology for deNO_x after treatment of diesel exhausts. *Johnson Matthey Technol. Rev.*, 2015, vol. 59, no. 3, pp. 221–232. DOI: 10.1595/205651315x688280
URL: <https://www.technology.matthey.com/article/59/3/221-232/>
- [10] Марков В.А., Мягков Л.Л., Маластовский Н.С. и др. Моделирование испарения и термического распада мочевины в системах выпуска дизелей. *Автомобильная промышленность*, 2017, № 10, с. 8–14.
- [11] Кавтарадзе Р.З. Теория поршневых двигателей. Специальные главы. М., Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016.
- [12] Рысс К.Н., Денисов А.А., Грехов Л.В. и др. Расчётное прогнозирование расходных характеристик распылителей дизельной топливной аппаратуры. *Известия ВолгГТУ*, 2013, т. 5, № 12(115), с. 57–60.
- [13] Сыркин П.Э., Щербачков В.В. Основы прикладной газовой динамики. Нижний Новгород, НГТУ, 2010.
- [14] Акимов В.С., Бартенев Г.Ю. Моделирование распада струй, формируемых форсунками с использованием ПК FLOWVISION. *Инженерные системы – 2015. Труды Межд. форума*. М., МАКС Пресс, 2015, с. 243.
- [15] Варгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М., Наука, 1972.
- [16] Benjamin S.F., Roberts C.A. Significance of droplet size when injecting aqueous urea into a selective catalytic reduction after-treatment system in a light-duty diesel exhaust. *Fuel systems for IC engines*. Woodhead Publishing, 2012, pp. 43–60.
- [17] Леванов А.В., Антипенко Э.Е. Введение в химическую кинетику. М., МГУ им. М.В. Ломоносова, 2006.
- [18] Sung D.Y., Kim S.J., Baik J.H., et al. Decomposition of urea into NH₃ for the SCR process. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 2004, vol. 43, no. 16, pp. 4856–4863. DOI: 10.1021/ie034052j
URL: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/ie034052j>

Аскерко Маргарита Владимировна — студентка кафедры «Лазерные и оптико-электронные системы», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Научный руководитель — Блинов Артем Сергеевич, ассистент кафедры «Поршневые двигатели» МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

METHODOLOGY FOR ASSESSMENT OF THE SPRAY POSITION IN SELECTIVE CATALYTIC RESTORATION SYSTEMS

M.V. Askerko

askerko99@mail.ru

SPIN-code: 9344-4488

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

Against the background of a continuous increase in the vehicle fleet, the issue of emissions of harmful substances entering with exhaust gases continues to be one of the most pressing. To solve it, many methods and tools have been developed, including various exhaust gas post-treatment systems. In this paper, we consider the system of selective catalytic neutralization, the principle of operation and the main factors affecting their effectiveness. Particular attention is paid to the issue of evaporation of the reagent injected into the exhaust tract. A mathematical model has been developed that makes it possible in the first approximation to determine the location of the nozzle, which ensures the complete evaporation of the reagent before entering the catalyst unit. On the basis of the proposed methodology, an appropriate calculation was performed for a promising diesel engine.

Keywords

Piston engine, diesel engine, exhaust gases, exhaust gases treatment systems, nitrogen oxides, urea injection, thermal decomposition, SCR system

Received 17.01.2019

© Bauman Moscow State Technical University, 2019

References

- [1] Frolov S.G., Roslyakov A.D. Decrease in toxicity of transport diesel engines by neutralisation nitrogen oxide of the fulfilled gases. *Vestnik of Samara University*, 2009, no. 3-2(19), pp. 138–142 (in Russ.).
- [2] Markov V.A., Bashirov R.M., Gabitov I.I. Toksichnost' otrabotavshikh gazov dizeley [Toxicity of burnt gas from engines]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2002 (in Russ.).
- [3] Malastovskiy N.S., Barchenko F.B., Grekhov L.V., et al. Determining the Diesel fuel injection rate shaping requirements for emission control purposes. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii* [Engineering Journal: Science and Innovation], 2017, no. 3. DOI: 10.18698/2308-6033-2017-3-1594 URL: <http://engjournal.ru/catalog/pmce/he/1594.html> (in Russ.).
- [4] Johnson T., Joshi A. Review of vehicle engine efficiency and emissions. *SAE Int. J. Engines*, 2018, vol. 11, no. 6, pp. 1307–1330. DOI: 10.4271/2018-01-0329 URL: <https://www.sae.org/publications/technical-papers/content/2018-01-0329>
- [5] Birkhold F., Meingast U., Wassermann P., et al. Modeling and simulation of the injection of urea-water-solution for automotive SCR DeNOx-systems. *Appl. Catal. B Environ.*, 2007, vol. 70, no. 1-4, pp. 119–127. DOI: 10.1016/j.apcatb.2005.12.035 URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926337306002402>
- [6] Sistema neytralizatsii otrabotavshikh gazov Selective Catalytic Reduction [Selective Catalytic Reduction: system for neutralization of burnt gas]. *help4auto.com*: website (in Russ.). URL: http://www.help4auto.com/download/ssp/424_Sistema_nejtralizacii_OG_SCR.pdf (accessed: 12.12.2018).

- [7] Koebel M., Elsener M., Kleemann M. Urea-SCR: a promising technique to reduce NO_x emissions from automotive diesel engines. *Catal. Today*, 2000, vol. 59, no. 3-4, pp. 335–345.
DOI: 10.1016/S0920-5861(00)00299-6
URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0920586100002996>
- [8] Markov V.A., Myagkov L.L., Malastovskiy N.S., et al. Urea using in piston engines' exhaust gases treatment systems. *Bezopasnost' v tekhnosfere* [Safety in Technosphere], 2017, vol. 6, no. 4, pp. 40–49 (in Russ.).
- [9] Twigg M.V. Urea-SCR technology for deNO_x after treatment of diesel exhausts. *Johnson Matthey Technol. Rev.*, 2015, vol. 59, no. 3, pp. 221–232. DOI: 10.1595/205651315x688280
URL: <https://www.technology.matthey.com/article/59/3/221-232>
- [10] Markov V.A., Myagkov L.L., Malastovskiy N.S., et al. Modeling evaporation and decomposition of urea solution for diesel exhaust system. *Avtomobil'naya promyshlennost'*, 2017, no. 10, pp. 8–14 (in Russ.).
- [11] Kavtaradze R.Z. Teoriya porshnevnykh dvigateley. Spetsial'nye glavy [Theory of piston engines. Special chapters]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2016 (in Russ.).
- [12] Ryss K.N., Denisov A.A., Grekhov L.V., et al. Computational assessment of metering characteristics of spray valve for diesel fuel injection equipment. *Izvestiya VolgGTU* [Izvestia VSTU], 2013, vol. 5, no. 12(115), pp. 57–60 (in Russ.).
- [13] Syrkin P.E., Shcherbakov V.V. Osnovy prikladnoy gazovoy dinamiki [Fundamentals of applied gas dynamics]. Nizhniy Novgorod, NNSTU Publ., 2010 (in Russ.).
- [14] Akimov V.S., Bartenev G.Yu. [Modelling of jet breakup formed by nozzle using PK FLOWVISION]. *Inzhenernye sistemy – 2015. Trudy Mezhd. foruma* [Engineering systems-2015. Proc. Int. forum]. Moscow, MAKS Press, 2015, pp. 243 (in Russ.).
- [15] Vargaftik N.B. Spravochnik po teplofizicheskim svoystvam gazov i zhidkostey [Handbook on thermal-physical properties of gases and liquids]. Moscow, Nauka Publ., 1972 (in Russ.).
- [16] Benjamin S.F., Roberts C.A. Significance of droplet size when injecting aqueous urea into a selective catalytic reduction after-treatment system in a light-duty diesel exhaust. *Fuel systems for IC engines*. Woodhead Publishing, 2012, pp. 43–60.
- [17] Levanov A.V., Antipenko E.E. Vvedenie v khimicheskuyu kinetiku [Introduction into chemical kinetics]. Moscow, Lomonosov MSU Publ., 2006 (in Russ.).
- [18] Sung D.Y., Kim S.J., Baik J.H., et al. Decomposition of urea into NH₃ for the SCR process. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 2004, vol. 43, no. 16, pp. 4856–4863. DOI: 10.1021/ie034052j
URL: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/ie034052j>

Askerko M.V. — Student, Department of Laser and Optical Electronic Systems, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Scientific adviser — A.S. Blinov, Assist. Professor, Department of Piston Engines, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.