

К ВОПРОСУ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМ НЕЙТРАЛИЗАЦИИ ОКСИДОВ АЗОТА В ДИЗЕЛЬНЫХ ДВС

К.Т.Н. Шабанов А.В.¹, Кондратьев Д.В.¹, Ванин В.К.¹, к.т.н. Дунин А.Ю.²

¹ФГУП «НАМИ», Москва, Россия

²Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), Москва, Россия
Saaha-1955@mail.ru

Самым эффективным методом снижения оксидов азота в ОГ дизелей является селективная очистка методом $SCR-NH_3$. Метод использует аммиак, выделяемый в процессе термоллиза и гидролиза раствора мочевины при ее впрыскивании через форсунку в нейтрализатор. Этот метод имеет сравнительно невысокую эффективность очистки ОГ от оксидов азота. Основным фактором, препятствующим достижению высокой эффективности системы нейтрализации NOx , является недостаточно высокая температура при реализации данного процесса.

В статье выполнен анализ различных способов поднятия эффективности процесса нейтрализации и предлагается новый метод нейтрализации NOx за счет применения впрыска мочевины в цилиндры ДВС на такте расширения в дизельном ДВС. Эффективность может быть достигнута за счет более высокой температуры ОГ в цилиндре ДВС и увеличения времени процесса термоллиза и гидролиза мочевины.

Рассмотрена кинетика разложения оксидов азота, процесс окисления NH_3 и расчет температурных условий в цилиндре дизельного ДВС на такте выпуска ОГ. Проанализирован опыт нейтрализации NOx , содержащихся в дымовых газах тепловых станций, где очистка от NOx протекает при высоких температурах без использования катализатора.

Показано, что модернизация процесса $SCR-NH_3$ за счет впрыска мочевины на такте выпуска ОГ в дизельном ДВС позволит упростить существующий метод нейтрализации NOx и получить при этом дополнительные преимущества для современного высокофорсированного двигателя.

Ключевые слова: отработавшие газы дизелей, выбросы NOx , эффективность метода $SCR-NH_3$, впрыск мочевины.

Для цитирования: Шабанов А.В., Кондратьев Д.В., Ванин В.К., Дунин А.Ю. К вопросу повышения эффективности систем нейтрализации оксидов азота в дизельных ДВС // Известия МГТУ «НАМИ». 2021. № 2 (48). С. 101–112. DOI: 10.31992/2074-0530-2021-48-2-101-112.

Введение

В последнее десятилетие при введении в ЕС новых более жестких норм к выбросам вредных веществ приоритет отдается наиболее опасным оксидам азота (NOx) и твердым частицам. Требования Правил 49-06 существенно жестче требований Правил № 49-05: по оксидам азота – в 5 раз; по частицам – в три раза [1,2]. Технология снижения содержания в отработавших газах (ОГ) NOx на каталитических нейтрализаторах в бензиновых ДВС достаточно хорошо отработана. Современные системы каталитической нейтрализации вредных веществ бензиновых ДВС, работающих с $\alpha = 1,0$ имеют высокую эффективность нейтрализации оксидов азота более 95 %. Процесс каталитической нейтрализации при этом протекает при температуре 300–900 °С и при больших скоростях

потока отработанных газов ДВС с малым временем контакта ОГ с катализатором.

В дизельном ДВС, использующем в работе бедные смеси в условиях отсутствия в ОГ восстановителей, применяются другие принципы каталитической нейтрализации NOx . Самым эффективным методом снижения оксидов азота с ОГ дизелей является селективная очистка ОГ методом $SCR-NH_3$ (*Selective Catalytic Reduction*). В настоящее время разработаны и другие типы нейтрализации NOx , например $SCR-HC$, в которых используется топливо для поддержания каталитической реакции восстановления азота и создания высокой температуры в нейтрализаторе. Однако данный метод приводит к существенному увеличению расхода топлива ДВС и соответственно выбросу CO_2 .

Применение системы $SCR-NH_3$, как утверждается специалистами, позволяет расходовать на 30 % меньше топлива, чем в системах нейтрализации $SCR-HC$. Поэтому все импортные автомобили среднего и большого классов поставляются в Россию по технологии $SCR-NH_3$. В Европе эта технология также широко используется и устанавливается на 70 % автомобилей. В качестве восстановителей в системе очистки $SCR-NH_3$ используется аммиак (NH_3), выделяемый в процессе термолиза и гидролиза раствора мочевины $CO(NH_2)_2$ при ее впрыскивании через форсунку в нейтрализатор.

В публикациях [3, 4] было показано, что для обеспечения высокой эффективности очистки ОГ дизельных ДВС от вредных веществ необходимо решить ряд технических проблем у систем нейтрализации ОГ дизелей. О необработанности системы $SCR-NH_3$, применяемой в настоящее время, говорит и тот факт, что предельные европейские нормы выбросов по оксидам азота для ДВС с искровым зажиганием для автомобилей категории М, N1 и N2 в 3–3,4 раза ниже, чем для ДВС с воспламенением от сжатия. Связано это с невозможностью выполнения более жестких требований по выбросам NOx этими системами.

Сравнительно невысокая эффективность очистки ОГ дизелей 30–90 % по оксидам азота вызывает соответствующее к ним отношение с позиции общественного экологического мнения на западе. Достаточно сказать, что во Франции на законодательном уровне дизельные двигатели, даже соответствующие современным нормам, уже исключили из «категории 1», к которой относятся самые экологически чистые ДВС. Невозможность выполнения дизельными двигателями жестких норм по выбросам ВВ вынудило в европейском

экологическом законодательстве применить для дизелей более мягкие нормы стандарта ЕВРО, чем для бензиновых ДВС. Известно, что достаточно большую мощность у ДВС для транспортных средств можно получить только применяя процесс воспламенения топлива от сжатия, поэтому по крайней мере для крупнотоннажных грузовиков альтернативы дизельным ДВС просто нет. Напрашивается вопрос, можно ли решить проблему повышения эффективности систем нейтрализации оксидов азота в дизелях? Чтобы ответить на этот вопрос, рассмотрим причины, лежащие в основе этой проблемы, препятствующие ее решению, и направления, по которым идут разработчики современных систем нейтрализации для дизельных ДВС.

1. Анализ методов селективной очистки ОГ в системе выпуска дизелей

На рис. 1 приведена система нейтрализации вредных веществ (ВВ) с ОГ ДВС *tdi-V6 Volkswagen* уровня выбросов ЕВРО-5, использующим метод $SCR-NH_3$.

Использование метода $SCR-NH_3$ обосновано возможностями получения относительно высокой эффективности снижения NOx по отношению к другим методам, а также теми возможностями, которые можно достичь при ее модернизации. Максимально достижимая степень конверсии NOx в системе очистки метода при оптимальных условиях достигает 90 %. Система каталитического восстановления окислов азота содержит окислительный катализатор, сажевый фильтр, восстановительный нейтрализатор, нейтрализатор финишной очистки, блок управления, устройство хранения, подогрева и подачи мочевины, систему

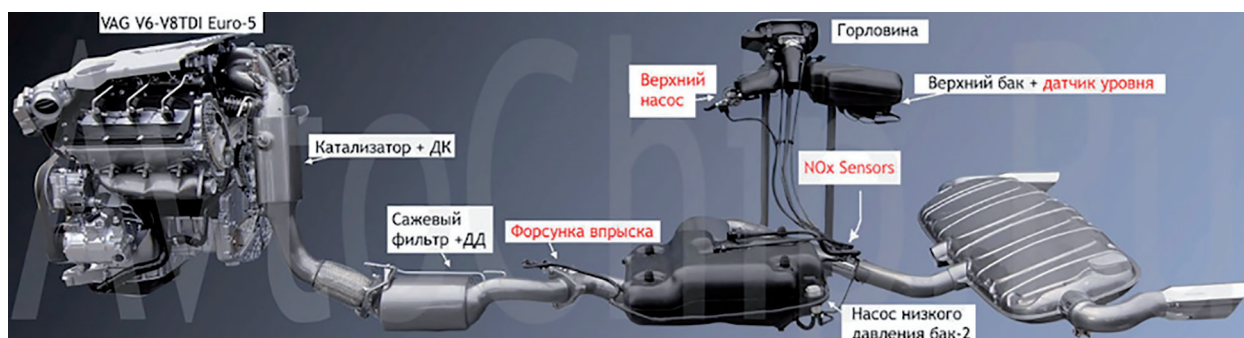


Рис. 1. Система нейтрализации ВВ с ОГ *Volkswagen* уровня выбросов ЕВРО-5 методом $SCR-NH_3$

Fig. 1. Aftertreatment system of explosives with *Volkswagen* exhaust gases of EURO-5 emission level using the $SCR-NH_3$ method

подачи мочевины через форсунку в нейтрализатор.

В системе селективной каталитической нейтрализации оксидов азота методом *SCR-NH3* используется 30–35 % раствор мочевины. Это соотношение в отличие от высококонцентрированных растворов не опасно для окружающей среды и человека при его применении. Давление в системе подачи мочевины составляет 0,3–0,6 МПа. На рис. 2 и 3 показаны подающий *AdBlue* модуль и бак хранения мочевины с системами подогрева реагента и подачи к форсункам дизельного ДВС *Volkswagen TDI* [5].

Мочевина, проходя через форсунку, смешивается с воздушным потоком и впрыскивается в поток отработавших газов после сажевого фильтра в виде облака капель. В последней модернизированной системе селективной каталитической нейтрализации мочевины впрыскивается без использования сжатого воздуха.

Следует сказать, что для эффективного протекания реакции на катализаторе требуется высокая температура 400–550 °С и опреде-

ленное время для процесса гидролиза и термоллиза мочевины. Из-за охлаждения ОГ ДВС при движении по выпускному тракту реальный диапазон работы системы нейтрализации ограничивается пределами 250–500 °С. Поэтому эффективность процесса нейтрализации *NOx* составляет 30–90 %. Решают проблему повышения эффективности процесса увеличением протяженности зоны между форсункой подачи мочевины и катализатором, а также изыскивают другие методы интенсификации этого процесса, например, путем установки специальных катализаторов гидролиза мочевины. Предварительный гидролиз мочевины существенно повышает степень восстановления *NOx*, при этом просок аммиака через нейтрализатор финишной очистки резко снижается [6]. Согласно результатам экспериментальных исследований, при температуре выше 550 °С при использовании катализаторов начинается уже рост образования вторичного *NOx* и падает эффективность процесса нейтрализации [6, 7]. При температурах



Рис. 2. Подающий *AdBlue* модуль с системой подогрева и подачи реагента к форсункам дизельного ДВС *Volkswagen tdi-25-l-evro-5* ($V_h = 2,5$ л, $N_e = 120$ кВт)

Fig. 2. *AdBlue* supply module with a heating system and reagent supply to the injectors of the *Volkswagen tdi-25-l-evro-5* diesel internal combustion engine ($V_h = 2,5$ l, $N_e = 120$ kW)



Рис. 3. Подогреваемые баки хранения мочевины *AdBlue*, применяемые на автомобилях категории *N1* и *N3*

Fig. 3. Heated *AdBlue* urea storage tanks used on *N1* and *N3* category vehicles

1000–1300 К оксиды азота становятся основным продуктом реакции.

Одним из существенных недостатков систем *SCR-NH₃* также является наличие в ОГ нормируемого Правилами ООН № 49-06 токсичного вещества аммиака (*NH₃*), который относится к газам 4-го класса опасности [8]. Он относится к группе веществ удушающего действия. Аммиак является высокотоксичным соединением, даже находясь в крови в относительно небольших концентрациях. Симптомы аммиачного отравления уже проявляются в 23-кратном превышении предельно-допустимых концентраций ПДК.

Применение в системах передозировки подачи мочевины для повышения эффективного процесса нейтрализации *NO_x* приводит к проскоку аммиака через нейтрализатор финишной очистки. Выбросы *NH₃* уровня Евро V допускают концентрации *NH₃* = 25 млн⁻¹, не более. В эксплуатации систем Правилами № 49-06 допускается некоторый их рост. Но для его ограничения предусмотрен контроль *NH₃* бортовой системой диагностики от датчика, установленного на выходе из системы.

Для контроля процесса нейтрализации в применяемых системах очистки *SCR-NH₃* дизельных двигателей установлены датчики: температуры реагента нейтрализации, температуры отработавших газов на входе в нейтрализатор, датчики концентрации *NO_x* и *NH₃* в отработавших газах после нейтрализатора. Дозирование мочевины при впрыскивании регулируется блоком управления. На рис. 4 приведена современная схема системы очистки *SCR-NH₃* дизельных двигателей [5, 9].

Следует сказать о других недостатках существующей данной системе, которые заключаются в:

- сложности создания в каталитическом нейтрализаторе необходимой температуры на различных режимах работы ДВС (реальный температурный диапазон работы системы нейтрализации ограничивается пределами 200–500 °С);
- низкой степени восстановления *NO_x* на отдельных режимах работы ДВС вследствие недостаточного времени для предварительного гидролиза мочевины;
- неравномерным распределением аммиака в зоне реакции нейтрализации;
- низкой эффективности процесса восстановления азота подачей избыточного аммиака в катализаторе и появляющемся вследствие этого проскоке *NH₃* через восстановительный нейтрализатор.

Для поднятия эффективности процесса нейтрализации применяются способы повышения равномерности распределения реагента при его подаче в нейтрализатор, выбор параметров впрыскивания и оптимальное его количественное дозирование системой через форсунку и другие мероприятия. Распыливание *AdBlue* осуществляется при помощи форсунки (рис. 5) с электромагнитным клапаном. Параметры угла распыливания факела *AdBlue*, строго выбираются, т.к. они в значительной мере влияют на процесс эффективности процесса нейтрализации [5, 9].

При распылении и разложении мочевины должно быть обеспечено равномерное объемное распределение аммиака в потоке перед его поступлением в катализатор. Для этого в при-

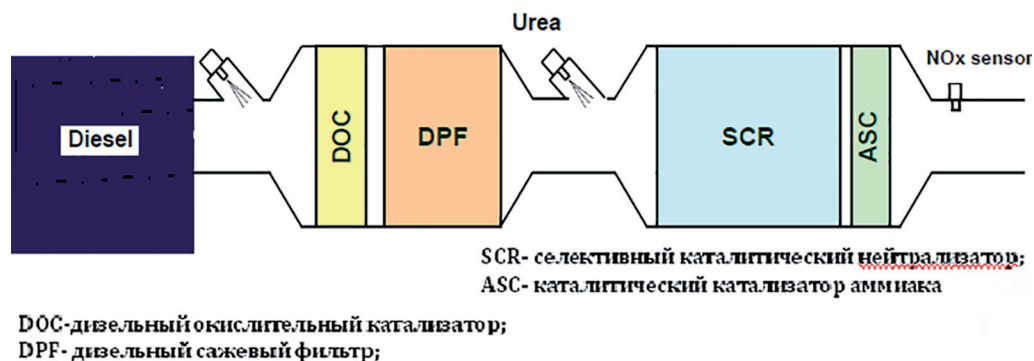


Рис. 4. Схема системы очистки ОГ методом *SCR-NH₃* в дизельных ДВС

Fig. 4. *SCR-NH₃* exhaust gas cleaning system diagram in diesel internal combustion engines

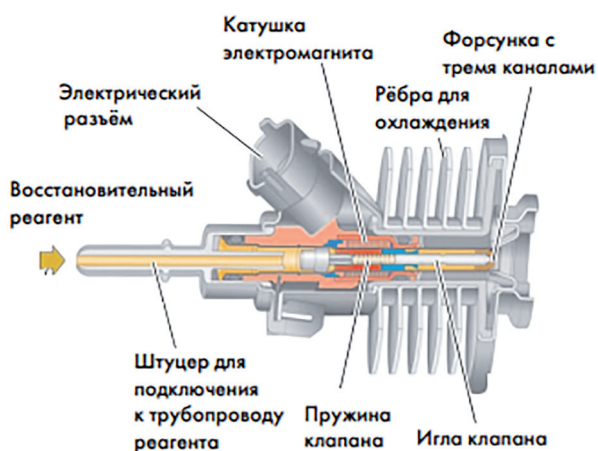


Рис. 5. Форсунка впрыскивания *AdBlue* в систему выпуска ОГ дизелей

Fig. 5. *AdBlue* injection nozzle for the exhaust system of diesel engines

меняемых системах необходимы меры по активному перемешиванию газового потока, например, смесители, которые ускоряют процессы испарения и диффузии раствора и способствуют разложению мочевины, обеспечивая однородность потока.

В эксплуатации у системы очистки методом *SCR-NH₃* возникают и другие проблемы. При работе системы происходит забивание сопел форсунок кристаллами мочевины, что снижает эффективность каталитического процесса.

Производители систем решают эту проблему различными методами. Основное направление решения проблемы забивания выходных отверстий кристаллами мочевины при пониженных температурах – это применение нагревательных элементов в системе подачи мочевины. Также осуществляется подогрев бака хранения мочевины.

Применяются также устройства, обеспечивающие лучшее смешивание и равновесное распределение капель мочевины в потоке ОГ. На рис. 6 показано устройство «микшер», обеспечивающее равномерное смешение мочевины в потоке ОГ ДВС. Применяемый фирмой *Volkswagen* микшер для этой цели играет роль отражающей поверхности для распыленных капель мочевины. При соударении с поверхностью микшера распыленные капли дробятся. Это приводит к тому, что впрыснутая мочевина быстрее испаряется и переходит в газообразное состояние. Кроме того, это позволяет исключить попадание крупных капель распыленной мочевины на восстановительный катализатор. Дополнительно, геометрическая форма микшера придает потоку ОГ вращательное движение, что приводит к лучшему смешиванию и равновесному распределению капель в потоке ОГ.

Доля восстановителя (NH_3/NO), поступающего в катализатор, рассчитывается блоком управления и является выходным параметром расчетной математической модели процесса нейтрализации. При расчете массового потока ОГ принимается, что он соответствует массовому расходу воздуха во впускном канале и массе впрыскиваемого топлива.

Контроль работы системы *SCR* и его самодиагностика производится с помощью сигнала от датчика *NOx*, который также определяет и эффективность действия восстановительного катализатора. Для этого измеренное значение сравнивается с математической моделью расчета количества оксидов азота в электронном блоке управления двигателя.

Если значение эффективности станет меньше определенного, включаются лампа

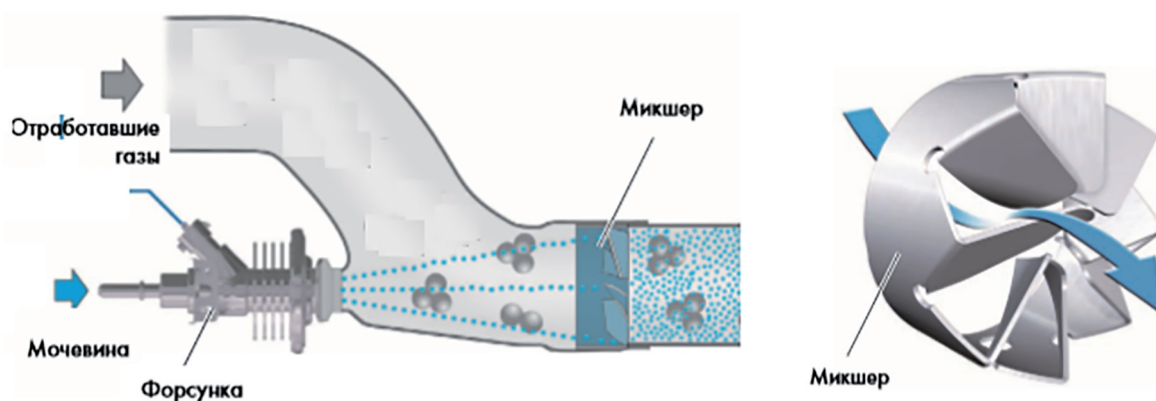


Рис. 6. Системы впрыскивания и обеспечения равномерности смешения мочевины с ОГ ДВС tdi-V6 Volkswagen

Fig. 6. Injection systems and ensuring uniform mixing of urea with exhaust gas of tdi-V6 Volkswagen internal combustion engines

check engine и контрольная лампа системной ошибки на дисплее, при этом также вносится ошибка в блок электронной памяти неисправностей.

Германский концерн *Daimler* устанавливает дополнительное дозирующее устройство впрыскивания раствора мочевины внутрь двухстеночной трубы перед катализатором, обеспечивает точную дозировку мочевины, что позволяет селективно проводить восстановление окислов азота до свободного азота при умеренных температурах (300–400 °С). Оно служит своеобразным термосом, поддерживающим нужную оптимальную температуру отработавших газов, и за счет этого позволяет снижать концентрацию вредных окислов азота ДВС. Немецкая компания *Emitec*, занимающая ведущие позиции в мире по разработкам и выпуску каталитических нейтрализаторов, также использует принцип нагревания мочевины до значительных температур и интенсификации процессов ее гидролиза и термоллиза для поднятия эффективности нейтрализации NOx [5, 9].

Фирма *Robert Bosch GmbH* предложила систему *Denoxtronic*, в которой в результате сгорания топлива температура ОГ поднимается почти до 600 °С, при которой сгорает сажа в фильтре и повышается эффективность каталитического процесса в нейтрализаторе NOx . Американская компания *Eaton* разработала сложную и дорогую технологию на основе *SCR*, в которой аммиак получают в системе выпуска ДВС и воздействуют на мочевину высокими температурами. Однако эти методы довольно сложны и приводит к существенно-

му увеличению расхода топлива на дизельных ДВС и соответственно выбросу CO_2 .

Следует также сказать, что перечисленные меры не позволяют достичь уровня выбросов ЕВРО-6, поэтому производители систем нейтрализации для решения проблемы вынуждены применять дополнительно рециркуляцию отработавших газов, которая, как известно, при ее негативном воздействии на рабочий процесс и проблемах в эксплуатации ДВС может существенно (до 50 %) повысить эффективность процесса нейтрализации NOx . В этих системах для повышения показателя рециркуляции и более эффективного снижения уровня оксидов азота применяют охлаждение радиатором рециркулируемых отработавших газов. Благодаря этому температура в камере сгорания дополнительно снижается, тем самым уменьшая выбросы NOx .

Целью данной работы является повышение эффективности процесса нейтрализации NOx доработкой системы путем создания благоприятных условий для реакций нейтрализации за счет применения впрыска мочевины в цилиндры ДВС на такте расширения в дизельном ДВС. Это достигается за счет более высокой температуры ОГ в цилиндре ДВС, интенсификации и увеличении времени процесса термоллиза и гидролиза мочевины, активным перемешиванием реагента в условиях работы турбокомпрессора ДВС. Но использование данного метода для процесса нейтрализации NOx сопряжено с проблемой возможного выхода вторичного NOx в условиях выделения аммиака при впрыске мочевины в цилиндры ДВС при более высокой температуре, харак-

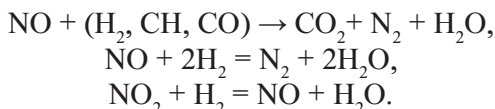
терной такту выпуска ОГ. В этой связи рассмотрим кинетику процессов взаимодействия оксидов азота с восстановителями на разных этапах процесса и влияние температурного фактора на процесс нейтрализации NOx .

2. Кинетика разложения оксидов азота в каталитическом реакторе, процесс окисления NH_3 на катализаторе и расчет температурных условий в цилиндре дизельного ДВС на такте выпуска ОГ

При очистке оксидов азота на катализаторе до молекулярного азота используются восстановители. В качестве восстановителей могут выступать водород (H_2), углеводороды (CH), окись углерода (CO) [7].

Катализатором служат элементы платиновой группы.

В общем виде реакцию нейтрализации оксидов азота можно записать уравнением:



При наличии CH оксиды азота взаимодействуют с углеводородами, кислород вступает в реакцию с углеродом, в результате образуются углекислый газ, азот и вода:



Однако при работе на бедных смесях, характерных для дизельного ДВС, восстановителей недостаточно для нейтрализации окси-

дов азота. Поэтому в качестве восстановителя используется аммиак мочевины, выделяемый при ее термолитизе и гидролизе. Основная реакция восстановления аммиаком азота идет с образованием воды:

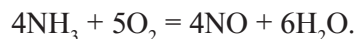


Суммарная реакция восстановления аммиаком азота имеет вид:



При протекании этих реакций решающую роль играет температура на катализаторе. Максимальная температура ОГ поле турбокомпрессора дизельного ДВС при моторных испытаниях на режиме максимального момента по 13 ступенчатому циклу Правил № 49 ООН, как видно из рис. 7 составляет 492 °С.

При более высоких температурах >550 °С эффективность процесса нейтрализации на катализаторе заметно снижается. Это обусловлено опережающей реакцией окисления (горения) аммиака с образованием вторичного NO . При этом возможно также образование закиси азота. Остаточный после реакции нейтрализации аммиак может значительно увеличивать выход NO по реакции:



Как показали исследования, передозировка подачи мочевины по отношению к выделяемому дизельным ДВС NO (NH_3/NO) повышает эффективность восстановительного процесса, но при этом резко увеличивается проскок аммиака через заградительный нейтрализатор

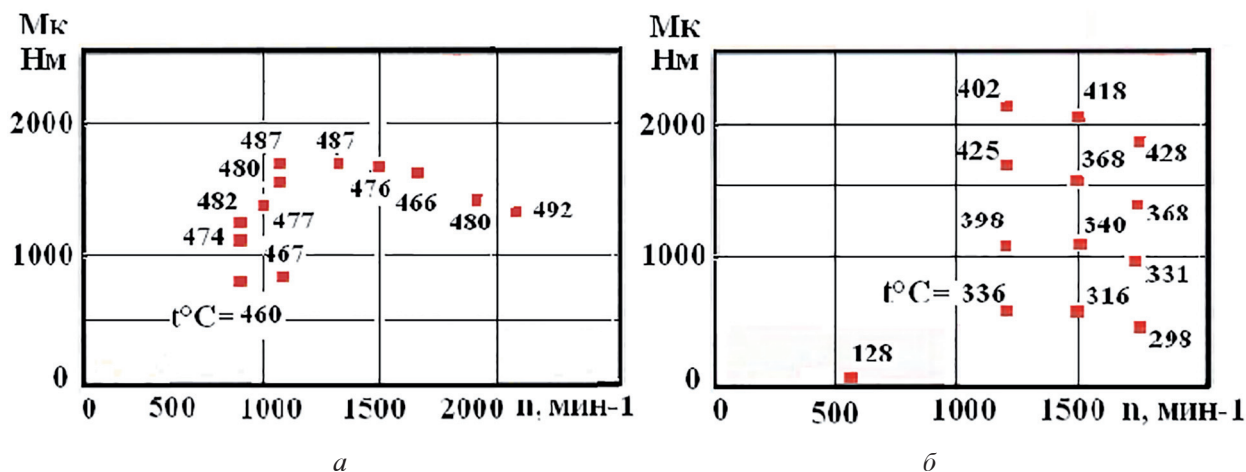
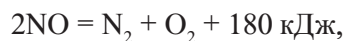


Рис. 7. Температура ОГ после турбокомпрессора дизельных ДВС:
 а) $Vh = 9$ л и б) $Vh = 12$ л

Fig. 7. Exhaust gas temperature after the turbocharger of diesel internal combustion engines:
 а) $Vh = 9$ l and б) $Vh = 12$ l

очистки газов [6]. При низких температурах ОГ 200–300 °С процесс нейтрализации замедляется из-за относительно медленного разложения мочевины. При температурах ниже 200 °С прекращается термолит, гидролиз мочевины и, как следствие, восстановление азота аммиаком и реакция идет при наличии NH_3 с образованием нитрида аммония NH_4NO_3 .

Рассматривая нейтрализацию NOx на катализаторе от температурного фактора, важно учитывать окисление аммиака в системе очистки, который в значительной степени влияет на эффективность нейтрализации методом $SCR-NH_3$. Эффективность метода $SCR-NH_3$ начинает падать с ростом температуры выше 550 °С и уже при 600 °С составляет 60 % [7]. При температурах 1000–1300 К (727–1027 °С) оксиды азота становятся основным продуктом реакции. При дальнейшем росте температуры среди продуктов реакции появляется и закись азота N_2O , однако ее доля существенно мала [7]. Возможны также реакции диссоциации азота и аммиака:



Полная диссоциация закиси азота наступает при 900 °С.

Как показали исследования [10, 11], процесс окисления аммиака на катализаторах происходит при относительно более низких температурах, чем окислительно-восстановительные процессы с впрыскиванием мочевины без катализатора, т.к. для выделения аммиака из мочевины должны произойти предварительные процессы термолита и гидролиза.

Учитывая изложенное выше, определим расчетным методом температурные условия впрыскивания мочевины на такте выпуска ОГ в цилиндры дизельного ДВС на наиболее нагруженном режиме работы по внешне скоростной характеристике ДВС, где концентрации NOx максимальны.

На рис. 8 представлены результаты расчета температуры в цилиндре дизельного ДВС при цикловой подаче дизельного топлива 100 мг/цикл и частоте вращения коленчатого вала ДВС, соответствующей максимальному крутящему моменту. Температура газов в цилиндре ДВС при завершении процесса сгорания при нагрузке ($P_e = 1,66$ МПа) составляет 1230 °С. В момент открытия выпускного

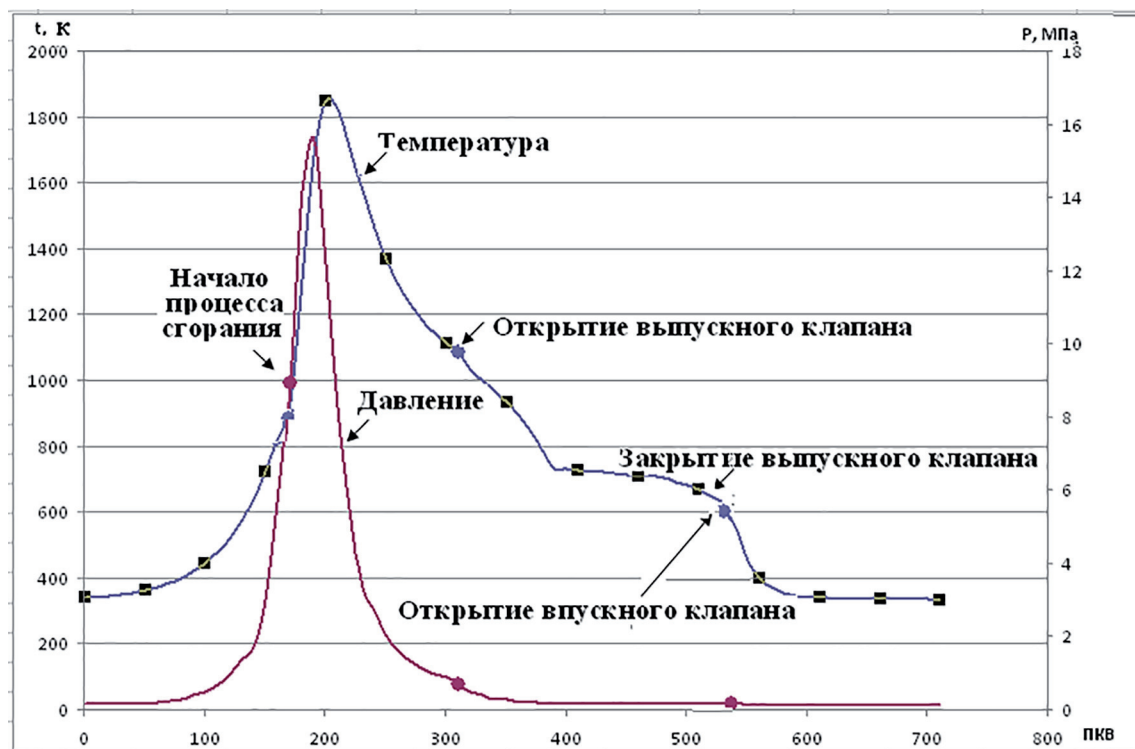


Рис. 8. Параметры в цилиндре, рассчитанные для дизельного ДВС, при цикловой подаче топлива 100 мг/цикл, $n = 1625 \text{ мин}^{-1}$, $P_e = 1,66 \text{ МПа}$ ($S/D = 124/107$, $\varepsilon = 17,3$)

Fig. 8. Parameters in the cylinder, calculated for a diesel internal combustion engine, with a cyclic fuel supply of 100 mg/cycle, $n = 1625 \text{ min}^{-1}$, $P_e = 1,66 \text{ MPa}$ ($S/D = 124/107$, $\varepsilon = 17,3$)

клапана она снижается до 813 °С, температура на выходе из турбокомпрессора ДВС составляет 527°С. При минимальной нагрузке, $Pe = 0,5$ МПа, $n = 1625$ мин⁻¹, температура в момент открытия выпускного клапана составляет 472 °С.

Расчетные данные хорошо согласуются с экспериментальными значениями температур, полученными при испытаниях на моторном стенде. Приведенные значения температур показывают, что если осуществлять впрыскивание мочевины в цилиндр ДВС после завершения открытия выпускного клапана, то условия для процесса термоллиза и гидролиза мочевины, а также восстановительных реакций будут благоприятны.

С учетом изложенного выше, следует рассмотреть уже имеющийся опыт селективной очистки газов от NOx с подачей мочевины при высоких температурах и технологии, применяемые в других отраслях промышленности.

3. Селективная некаталитическая очистка газов от NOx с подачей мочевины

Заслуживает внимания опыт нейтрализации NOx , содержащихся в дымовых газах тепловых станций. Эта технология очистки газов разработана в РГУ нефти и газа им. Губкина [12, 13]. Отличие предложенной РГУ системы очистки от метода $SCR-NH_3$ заключается в том, что очистка дымовых газов от NOx протекает при высоких температурах 850–1100 °С. Очистка газов при таких температурах осуществляется без катализаторов за счет подачи мочевины (карбамида). Разработанная технология обеспечивает более высокую степень очистки газов при меньшем удельном расходе восстановителя по сравнению с известными некаталитическими технологиями. Методы некаталитической очистки топочных газов являются менее затратными, однако их эффективность, как правило, значительно ниже по сравнению с каталитическими. Процесс очистки газов регулируется с помощью автоматической системы управления, которая позволяет задавать и поддерживать необходимую степень очистки газов от NOx .

Эта технология использует аминоксодержащие восстановители, находящиеся в газовой фазе. При разработке этих процессов было рассмотрено применение большого числа возможных восстановителей, но, как показали иссле-

дования, практическое значение имеют только аммиак и карбамид, причем карбамид является более предпочтительным с точки зрения экологической безопасности процесса.

В тепловых агрегатах станций в условиях более низких температур были использованы также и гибридные технологии, сочетающие низкотемпературное каталитическое и высокотемпературное некаталитическое восстановление оксидов азота. Это позволяет стабилизировать высокую эффективность очистки газов и обеспечить практически полную очистку от NOx в широком диапазоне температур, а также существенно снизить проскок непрореагировавшего аммиака. Установлено, что при низкой температуре NO_2 более устойчивы к процессу нейтрализации. В высокотемпературной зоне > 850 °С процесс нейтрализации оксидов азота осуществляется значительно легче, чем низкотемпературной. Оптимальная при некаталитической очистке предельная температура с точки зрения эффективности процесса с использованием карбамида находится в диапазоне температур 840–900 °С. При более высоких температурах дымовых газов, как это видно из рис. 10, эффективность процесса очистки дымовых газов от оксидов азота снижается [12, 13].

Исследования селективного каталитического восстановления оксидов азота дымовых газов проводились в реакторе при температуре 250–450 °С на вольфрамованадиевом оксидном катализаторе. Как видно из рис. 9, а, катализатор позволяет достичь степень очистки дымовых газов в 91 % с проскоком аммиака ниже 50 ppm. Некаталитические методы характеризуются меньшей степенью очистки, а проскок аммиака выше и требует дополнительного регулирования подачи реагента для обеспечения приемлемого уровня эффективности.

На рис. 9б приведено влияние высокой температуры на эффективность очистки дымовых топочных газов от NOx [12, 13]. При температуре 840 °С, как видно из рис. 9, б, идет наиболее эффективный процесс нейтрализации NOx .

При температуре выше 840 °С эффективность очистки дымовых газов начинает падать и при 1010 °С с концентрацией раствора мочевины 20 % она составляет 32 %. Увеличением концентрации мочевины до 40 % можно поднять эффективность очистки газов до 54 %. Но передозировка увеличивает концентрацию аммиака на выходе в дымовых газах

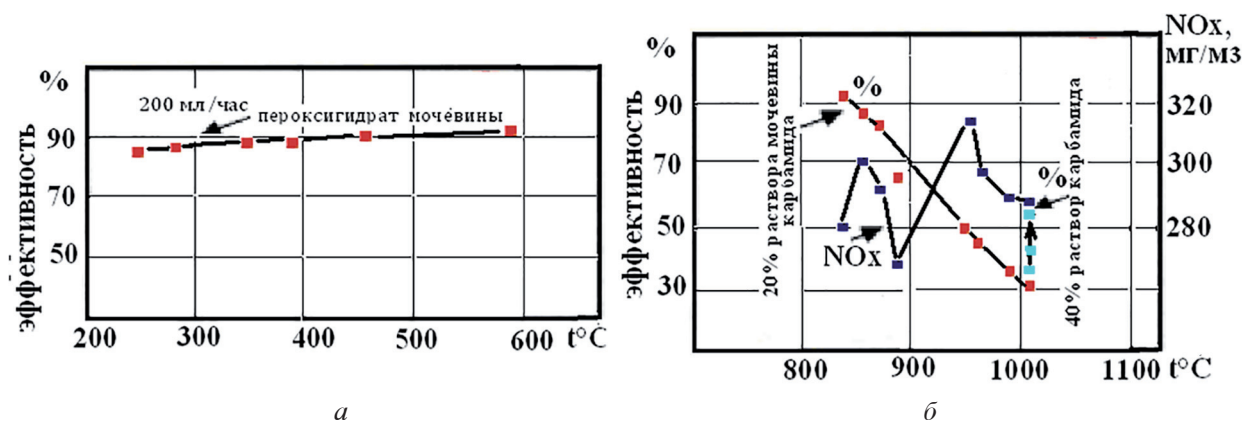


Рис. 9. Влияние температуры на эффективность очистки дымовых топочных газов от NOx [11]:
а) очистка от NOx на экспериментальной установке; б) очистка в дымовых трубах

Fig. 9. Influence of temperature on the efficiency of cleaning flue gases from NOx [11]:
a) cleaning from NOx at the pilot plant, b) cleaning in smoke flue

до 30–90 ppm [12, 13]. Максимальные концентрации NOx в очищенных дымовых газах составляют в среднем 230 млн⁻¹ в рабочем температурном диапазоне 840–1100 °С, что сопоставимо концентрациями NOx в ОГ дизельного ДВС уровня выбросов Евро-5.

Выводы

Выполненный анализ применяемых на дизельных ДВС систем очистки ОГ, использующих метод SCR-NH₃, показывает недоработанность применяемого метода нейтрализации NOx и его сложность. Основным фактором, препятствующим достижению высокой эффективности системы нейтрализации NOx, является недостаточно высокая температура при практической реализации данного процесса.

Для выполнения действующих в ЕС норм по выбросам NOx производители систем применяют целый комплекс мер, включая рециркуляцию ОГ. Это позволяет достичь необходимого уровня по выбросам NOx, действующего в настоящее время в ЕС.

Опыт нейтрализации NOx, содержащихся в газах тепловых станций, показывает, что при использовании карбамида оптимальная температура для обеспечения высокой эффективности процесса при некаталитической нейтрализации NOx находится в диапазоне 840–900 °С. Эта температура, как показывают приведенные расчеты, соответствуют параметрам состояния ОГ после завершения открытия выпускного клапана у дизельного ДВС.

Модернизация применяемого в настоящее время процесса SCR-NH₃ за счет впрыска мочевины на такте выпуска ОГ в дизельном ДВС

позволит упростить существующий метод нейтрализации NOx и получить при этом дополнительные преимущества для современного высокофорсированного двигателя.

Литература

1. Кутнев В.Ф., Кисуленко Б.В., Шюте Ю.В. Экологическая безопасность автомобилей с двигателями внутреннего сгорания. Экология. Машиностроение. Москва. 2009. 244 с.
2. Правила № 49 ЕЭК ООН. Единообразные предписания, касающиеся подлежащих принятию мер по ограничению выбросов загрязняющих газообразных веществ и взвешенных частиц двигателями с воспламенением от сжатия и двигателями с принудительным зажиганием, предназначенными для использования на транспортных средствах: поправки серии 06 ЕЭК ООН.
3. Шабанов А.В., Кондратьев Д.В., Соломин В.А., Ванин В.К. К вопросу снижения выбросов оксидов азота дизельными двигателями внутреннего сгорания. Труды НАМИ. 2020. № 1 (280). С. 47–55.
4. Шабанов А.В., Соломин В.А., Шабанов А.А. Способ повышения эффективности системы нейтрализации оксидов азота дизельного ДВС и эффективности его работы. Известия МГТУ МАМИ. 2018. № 4 (38). С. 77–84.
5. wp-content/uploads/2019/08/sistema-nejtralizacii-otrabotavshih-gazov-selective-catalytic-reductio.
6. Панчишный В.И., Воробьев И.Ю. Нейтрализация оксидов азота в отработавших газах дизелей. Двигателестроение. 2005. № 2. С. 35–42.
7. Кульчевский А.Р. Исследование процессов образования и разработки методов снижения выбросов вредных веществ с ОГ дизелей внедорожных

- машин. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. Владимир. 2006. 337 с.
8. Грушко Я.М. Вредные неорганические соединения в промышленных выбросах в атмосферу. Ленинград. «Химия». 1987. 79 с.
 9. W. Busch, D. Bohn, H. Burgartz, K. Hoffmann, D. Smith. Уменьшение содержания вредных веществ. MSI Motor Service International GmbH. Germany.
 10. Калугин В.В., Калинчук В.В., Черненко А.С. Высокотемпературное окисление аммиака на платиновом катализаторе при параллельном образовании азотсодержащих продуктов / 2015 г. КИНЕТИКА И КАТАЛИЗ. Одесский национальный университет им. И.И. Мечникова. 2015. Т. 56, № 3. С. 333–341.
 11. Олисов А.В. Окисление аммиака на платиноидных катализаторах. Автореферат диссертации на соискание ученой степени к.т.н. Москва 1990. 20 с.
 12. Способ очистки дымовых газов от оксидов азота. Патент RU 2314861. Владелец патента: Кулиш О.Н. Российский Государственный Университет нефти и газа им. И.М. Губкина. <http://www.findpatent.ru/patent/231/2314861.html>
 13. Способ управления впрыском мочевины в систему обработки оксидов азота с селективным каталитическим восстановлением. <http://www.findpatent.ru/patent/247/2477374>.
- ### References
1. Kutenev V.F., Kisulenko B.V., Shyute YU.V. *Ekologicheskaya bezopasnost' avtomobiley s dvigatelyami vnutrennego sgoraniya. Ekologiya* [Environmental safety of vehicles with internal combustion engines. Ecology]. Moscow. Mashinostroyeniye Publ. 2009. 244 p.
 2. Pravila № 49 YEEK OON. Yedinoobraznyye predpisaniya, kasayushchiyesya podlezhashchikh prinyatiyu mer po ogranicheniyu vybrosov zagryaznyayushchikh gazoobraznykh veshchestv i vzveshennykh chastits dvigatelyami s vosplamneniyem ot szhatiya i dvigatelyami s prinuditel'nyim zazhiganiyem, prednaznachennymi dlya ispol'zovaniya na transportnykh sredstvakh: popravki serii 06 YEEK OON [Uniform provisions concerning the measures to be taken against the emission of gaseous and particulate pollutants from compression ignition engines and positive ignition engines for use in vehicles: UNECE 06 series of amendments].
 3. Shabanov A.V., Kondrat'yev D.V., Solomin V.A., Vanin V.K. The issue of reducing nitrogen oxide emissions from diesel internal combustion engines. *Trudy NAMI*. 2020. No 1 (280), pp. 47–55 (in Russ.).
 4. Shabanov A.V., Solomin V.A., Shabanov A.A. A method for increasing the efficiency of the system for neutralizing nitrogen oxides of a diesel internal combustion engine and the efficiency of its operation. *Izvestiya MGTU MAMI*. 2018. No 4 (38), pp. 77–84 (in Russ.).
 5. [wp-content/uploads/2019/08/sistema-nejtralizacii-ot-rabotavshih-gazov-selective-catalytic-reductio](http://www.findpatent.ru/patent/2019/08/sistema-nejtralizacii-ot-rabotavshih-gazov-selective-catalytic-reductio).
 6. Panchishnyy V.I., Vorob'yev I.YU. Neutralization of nitrogen oxides in diesel exhaust gases. *Dvigatolestroyeniye*. 2005. No 2, pp. 35–42 (in Russ.).
 7. Kul'chevskiy A.R. *Issledovaniye protsessov obrazovaniya i razrabotki metodov snizheniya vybrosov vrednykh veshchestv s OG dizeley vnedorozhnykh mashin. Dissertatsiya na soiskaniye uchenoy stepeni doktora tekhnicheskikh nauk* [Investigation of the processes of formation and development of methods for reducing emissions of harmful substances with exhaust gases of diesel engines of off-road vehicles: Dissertation for Degree of DSc in Engineering]. Vladimir. 2006. 337 p.
 8. Grushko YA.M. *Vrednyye neorganicheskiye soyedineniya v promyshlennykh vybrosakh v atmosferu* [Harmful inorganic compounds in industrial air emissions]. Leningrad. «KhimiYA» Publ.. 1987. 79 p.
 9. W. Busch, D. Bohn, H. Burgartz, K. Hoffmann, D. Smith. *Umen'sheniye soderzhaniya vrednykh veshchestv*. MSI Motor Service International GmbH. Germany.
 10. Kalugin V.V., Kalinchak V.V., Chernenko A.S. High-temperature oxidation of ammonia on a platinum catalyst with the parallel formation of nitrogen-containing products. 2015 g. *KINETIKA I KATALIZ*. Odesskiy natsional'nyy universitet im. I.I. Mechnikova. 2015. Vol. 56, No 3, pp. 333–341 (in Russ.).
 11. Olishov A.V. *Okisleniye ammiaka na platinoidnykh katalizatorakh. Avtoreferat dissertatsii na soiskaniye uchenoy stepeni k.t.n.* [Oxidation of ammonia on platinum catalysts: Abstract to Dissertation for Degree of PhD in Engineering]. Moscow. 1990. 20 p.
 12. *Sposob ochistki dymovykh gazov ot oksidov azota* [Method for cleaning flue gases from nitrogen oxides]. Patent RU 2314861. Vladelet'sy patenta: Kulish O.N. Rossiyskiy Gosudarstvennyy Universitet nefi i gaza im. I.M. Gubkina. <http://www.findpatent.ru/patent/231/2314861.html>
 13. *Sposob upravleniya vpryskom mocheviny v sistemu obrabotki oksidov azota s selektivnym kataliticheskim vosstanovleniyem* [Method for controlling the injection of urea into the system for treating nitrogen oxides with selective catalytic reduction]. <http://www.findpatent.ru/patent/247/2477374>.

THE ISSUE OF IMPROVING THE EFFICIENCY OF NITROGEN OXIDE NEUTRALIZATION SYSTEMS IN DIESEL INTERNAL COMBUSTION ENGINES

PhD in Engineering **A.V. Shabanov**¹, **D.V. Kondratiev**¹, **V.K. Vanin**¹, PhD in Engineering **A.Yu. Dunin**²

¹State Research Center of the Russian Federation NAMI

²Moscow Automobile and Road State Technical University (MADI)

Saaha-1955@mail.ru

The most effective method of reducing nitrogen oxides in diesel exhaust gas is selective purification by the SCR-NH₃ method. The method uses ammonia released during thermolysis and hydrolysis of a urea solution when it is injected through a nozzle into a neutralizer. This method has a relatively low efficiency of cleaning the exhaust gas from nitrogen oxides. The main factor hindering the achievement of high efficiency of the NOx neutralization system is the insufficiently high temperature during the implementation of this process.

The article analyzes various ways to increase the efficiency of the neutralization process and proposes a new method for neutralizing NOx by using urea injection into the cylinders of the internal combustion engine at the expansion stroke in a diesel internal combustion engine. Efficiency can be achieved due to a higher exhaust gas temperature in the cylinder of the internal combustion engine and an increase in the time of the process of thermolysis and hydrolysis of urea.

The kinetics of the decomposition of nitrogen oxides, the process of NH₃ oxidation, and the calculation of temperature conditions in the cylinder of a diesel internal combustion engine at the exhaust cycle are considered. The experience of neutralization of NOx contained in the flue gases of thermal power plants, where NOx purification takes place at high temperatures without the use of a catalyst, is analyzed.

It is shown that the modernization of the SCR-NH₃ process, due to the injection of urea at the exhaust stroke in a diesel internal combustion engine, will simplify the existing method of NOx neutralization and at the same time obtain additional advantages for a modern high-speed engine.

Keywords: diesel exhaust gases, NOx emissions, efficiency of the SCR-NH₃ method, urea injection.

Cite as: Shabanov A.V., Kondratiev D.V., Vanin V.K., Dunin A.Yu. The issue of improving the efficiency of nitrogen oxide neutralization systems in diesel internal combustion engines. *Izvestiya MGTU «MAMI»*. 2021. No 2 (48), pp. 101–112 (in Russ.). DOI: 10.31992/2074-0530-2021-48-2-101-112.