

УДК 621.43.065.001.57

**В.Я. Груданов, Л.Т. Ткачева, Г.И. Белохвостов***УО «Белорусский государственный аграрный технический университет», г. Минск, Беларусь***ВЛИЯНИЕ ПРОЦЕССОВ УТИЛИЗАЦИИ ЭНЕРГИИ  
ОТРАБОТАВШИХ ГАЗОВ НА ТОКСИЧНОСТЬ И ЭФФЕКТИВНЫЕ  
ПОКАЗАТЕЛИ РАБОТЫ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ**

**Аннотация.** Рассмотрено влияние процессов утилизации отработавших газов на термодинамическую эффективность и эксплуатационные характеристики энергосиловых установок. Установлено, что при условии внешнего теплового воздействия на поток отработавших газов и отсутствии технической работы температура газов снижается, их плотность возрастает, давление падает, которое, в свою очередь, приводит к уменьшению скорости и снижению уровня шума. Получено уравнение первого закона термодинамики для потока рабочего тела с утилизацией теплоты. На основе закона Л.А. Вулиса записано уравнение, отражающее изменение скорости движения отработавших газов: интенсивное охлаждение газов приводит к торможению потока, т.е. имеет место эффект теплового торможения потока, что крайне необходимо для снижения уровня шума. Выполнен химический анализ отработавших газов, проведенный Могилевской горсанэпидемстанцией (учреждение здравоохранения «Могилевский зональный центр гигиены и эпидемиологии»). Установлено, что при среднем режиме работы карбюраторного двигателя при охлаждении газов на 100 К содержание в них  $\text{NO}_2$  уменьшается в среднем с 12,8 до 8,5 мг/м<sup>3</sup>. Разработана наземная автотранспортная энергетическая установка с утилизацией теплоты отработавших газов. Установка работает одновременно в трех режимах: трехкомпонентного каталитического нейтрализатора; эффективного глушителя шума; компактного утилизационного теплообменника. Показано положительное влияние процессов утилизации энергии отработавших газов на эффективные показатели работы двигателя: эффективную мощность, давление остаточных газов, температуру остаточных газов, коэффициент остаточных газов и коэффициент наполнения. Расчеты показали, что при интенсивном местном охлаждении число Маха уменьшается в пределах от 0,25 до 0,15 по мере увеличения коэффициента утилизации от 0,236 до 0,354 применительно к размерам серийных глушителей шума.

**Ключевые слова:** глушитель шума, двигатель внутреннего сгорания, отработавшие газы, токсичность, окислы азота, уровень шума выпуска, давление отработавших газов, катализатор, теплообменник, промежуточный теплоноситель, коэффициент наполнения, эффективная мощность, температура остаточных газов, число Маха, скорость звука, аэродинамический обтекатель, дефлектор, реактор, изобарная теплоемкость, диссипация энергии.

**V.Ya. Grudanov, L.T. Tkacheva, G.I. Belokhvostov***Belarusian State Agrarian Technical University, Minsk, Belarus***EFFECTS OF EXHAUST GAS ENERGY UTILIZATION PROCESSES  
ON TOXICITY AND EFFICIENCY  
PERFORMANCE OF INTERNAL COMBUSTION ENGINES**

**Abstract.** The effect of the processes of exhaust gas utilization on the thermodynamic efficiency and performance characteristics of power units is considered. It is established that under the condition of external thermal influence on the exhaust gas flow and absence of technical work, the gas temperature decreases, its density increases, pressure decreases, which, in its turn, leads to speed reduction and noise level reduction. The equation of the first law of thermodynamics for the working body flow with heat utilization is obtained. The equation reflecting changes in the exhaust gas velocity is written on the basis of L.A. Vulis's law: intensive cooling of gases leads to braking of the flow, i.e.

there is an effect of thermal braking of the flow that is extremely necessary for reduction of noise level. Chemical analysis of the exhaust gases was carried out by the Mogilev city sanitary and epidemiological station (the present name is the health care institution "Mogilev zone center of hygiene and epidemiology"). It was found that in the average mode of operation of a carburetor engine when cooling the gases at 100 K the content of  $\text{NO}_2$  in them decreases from 12.8 to 8.5  $\text{mg/m}^3$  on average. A ground-based vehicle power plant with utilization of exhaust gas heat has been developed. The unit operates simultaneously in three modes: three-component catalytic converter; effective noise silencer; compact utilization heat exchanger. The positive influence of exhaust gas energy utilization processes on the engine efficiency performance parameters: effective power, residual gas pressure, residual gas temperature, residual gas coefficient and filling factor, was shown. Calculations have shown that the Mach number decreases from 0.25 to 0.15 with intensive local cooling as the utilization factor increases from 0.236 to 0.354 with respect to the size of commercially available noise silencers.

**Keywords:** noise silencer, internal combustion engine, exhaust gas, toxicity, nitrogen oxides, exhaust noise level, exhaust gas pressure, catalyst, heat exchanger, intermediate coolant, fill factor, effective power, residual gas temperature, Mach number, sound speed, aerodynamic fairing, deflector, reactor, isobaric heat capacity, energy dissipation.

### Введение

Тепловые двигатели сегодня вырабатывают более 80 % всей энергии в мире и одновременно занимают первое место среди первичных источников загрязнения окружающей среды, так как только с их отработавшими газами (ОГ) теряется и бесполезно отводится в атмосферу от 30 до 40 % энергии сжигаемого топлива. В этой связи широкое использование в народном хозяйстве страны вторичных энергоресурсов в двигателях внутреннего сгорания (ДВС), к которым, прежде всего, следует отнести ОГ, является важной технической и экологической задачей в условиях складывающегося дефицита топливно-энергетических ресурсов и считается одним из путей повышения термодинамической эффективности и эксплуатационных характеристик энергосиловых установок [1].

Однако промышленное применение систем глубокой утилизации теплоты ОГ получило пока ограниченное распространение, в основном на судовых дизельных установках, и существенно сдерживается из-за отсутствия в литературе данных о влиянии утилизационных процессов на экологические и эффективные показатели работы ДВС, в частности, на такие, как токсичность и уровень шума выпуска, давление ОГ, коэффициент наполнения, эффективная мощность и др.

Неясно также, на каком участке выпускной системы ДВС целесообразно устанавливать утилизационные теплообменники и отбирать энергию от газов.

### Влияние процессов утилизации на изменение основных термодинамических параметров ОГ. Экспериментальные данные

В глушителях шума, особенно диссипативно-реактивного типа, в наибольшей степени проявляется эффект диссипации энергии движения газа – процесс рассеивания части механической энергии и превращения ее в теплоту трения  $q_{\text{тр}}$ . А процесс утилизации теплоты газов в глушителях шума характеризуется, прежде всего, отводом теплоты  $q_{\text{вн}}$  ( $dq_{\text{вн}} < 0$ ), а также теплотой  $q_{\text{хим}}$ , выделяемой при химических реакциях окисления  $\text{NO}$  в  $\text{NO}_2$  и дальнейшей полимеризации  $\text{NO}_2$  в  $\text{N}_2\text{O}_4$  (при достижении температуры газа ниже 420 K), причем реакции превращения  $\text{NO}$  в высшие оксиды происходят при значительном выделении теплоты, т.е.  $dq_{\text{хим}} > 0$ .

Таким образом, общее тепловое воздействие  $q$  на поток ОГ [1] складывается из отводимой наружу теплоты  $q_{\text{вн}}$ , теплоты трения  $q_{\text{тр}}$  и теплоты химических реакций  $q_{\text{хим}}$ , т.е.:

$$dq = dq_{\text{вн}} + dq_{\text{тр}} + dq_{\text{хим}} \quad (1)$$

С учетом выражения (1) уравнение первого закона термодинамики для потока рабочего тела с утилизацией теплоты (охлаждением газа) примет вид (при отсутствии технической работы ( $dl_{\text{техн}} = 0$ ) [2]:

$$dq_{\text{вн}} + dq_{\text{тр}} + dq_{\text{хим}} = di + WdW + gdh + dl_{\text{тр}}, \quad (2)$$

где  $i$  – удельная массовая энтальпия;

$W$  – скорость газов;

$g$  – ускорение свободного падения;

$h$  – геометрическая высота;

$l_{\text{тр}}$  – работа трения.

Полагая, что  $dl_{\text{тр}} = dq_{\text{тр}}$  и  $dh = 0$  (для горизонтально расположенных глушителей шума), уравнение (2) примет вид:

$$dq_{\text{вн}} + dq_{\text{хим}} = di + WdW. \quad (3)$$

Далее используя метод Л.А. Вулиса [3], для случая течения в трубе постоянного сечения при отсутствии технической работы и трения, но при наличии теплового воздействия, из выражения (3) получим уравнение, отражающее изменение скорости движения ОГ [1]:

$$(Ma^2 - 1) \frac{dW}{W} = - \frac{1}{VC_p} \left( \frac{\partial V}{\partial T} \right)_p (dq_{\text{вн}} + dq_{\text{хим}}), \quad (4)$$

где  $Ma$  – число Маха,  $Ma = W/a$ ;

$a$  – скорость звука;

$V$  – удельный объем газа;

$T$  – температура газа;

$C_p$  – удельная изобарная теплоемкость.

В процессах утилизации имеет место охлаждение газов и  $dq_{\text{вн}} < 0$ , но одновременно  $dq_{\text{хим}} > 0$ .

Рассмотрим два случая.

1.  $(dq_{\text{вн}} + dq_{\text{хим}}) < 0$ .

Так как для газов всегда  $C_p > 0$  и  $(\partial V / \partial T) > 0$  и при дозвуковом потоке  $Ma < 1$  (глушители, как правило, работают при  $Ma = 0,3 \div 0,4$ ), то интенсивное охлаждение газов  $(dq_{\text{вн}} + dq_{\text{хим}}) < 0$  приводит к торможению потока  $dW/W < 0$ . Следовательно, газ в потоке сжимается, и его скорость уменьшается, т.е. наблюдается так называемый эффект теплового торможения, что крайне необходимо для снижения уровня шума выпуска.

2.  $(dq_{\text{вн}} + dq_{\text{хим}}) > 0$ .

В этом случае имеет место подвод теплоты, что приводит к ускорению потока  $dW/W > 0$ , т.е. наблюдается отрицательное тепловое воздействие. Здесь же отметим, что при  $dq_{\text{вн}} = dq_{\text{хим}}$  глушитель шума не испытывает теплового воздействия, хотя газы охлаждаются и теплота отводится, но эта теплота эквивалентна теплоте, которая выделяется при химических реакциях окисления NO в высшие оксиды [4].

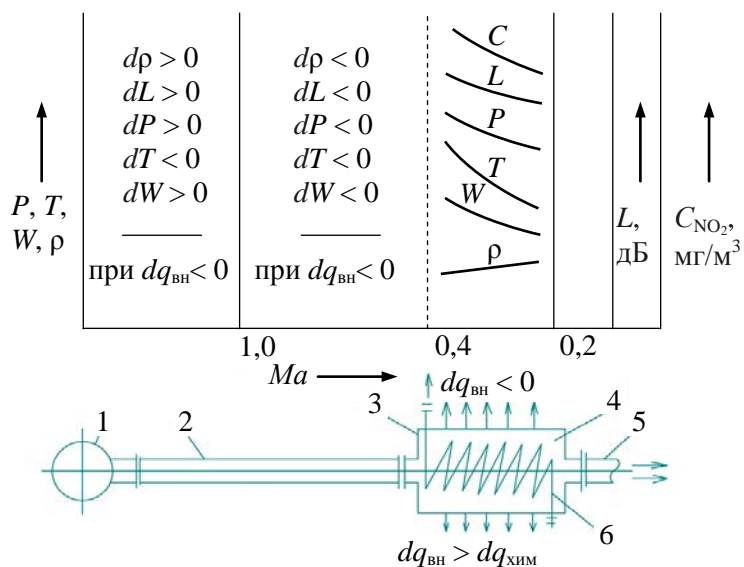
Значит, для достижения положительного эффекта теплового торможения газа и снижения при этом скорости должно соблюдаться условие  $dq_{\text{вн}} > dq_{\text{хим}}$  при  $Ma < 1$ .

Однако, если утилизационный теплообменник установить на участке системы выпуска, на котором ОГ движутся со сверхзвуковой скоростью, т.е.  $Ma > 1$ , то в этом случае согласно уравнению (4) поток ускоряется, что нежелательно.

По аналогии с равенством (4) и при условии, что  $(dq_{\text{вн}} + dq_{\text{хим}}) < 0$  и  $Ma < 1$ , температура газов снижается ( $dT < 0$ ), возрастает их плотность ( $dp > 0$ ) и падает давление ( $dP < 0$ ), которое в свою очередь и приводит к снижению шума выпуска. Отсюда также следует вывод о том, что утилизационный теплообменник должен быть установ-

лен на участке системы выпуска, где скорость движения ОГ меньше звуковой. Только в этом случае достигается положительный эффект в части снижения уровня шума.

На рисунке 1 показано влияние процессов утилизации теплоты ОГ на изменение основных термодинамических параметров потока (давление, температуру, скорость, плотность) и на содержание  $\text{NO}_x$  при размещении утили-



$C_{\text{NO}_2}$  – содержание  $\text{NO}_2$ ;  $L$  – уровень звукового давления;

1 – ДВС; 2 – приемная труба; 3 – глушитель шума;

4 – резонансная камера; 5 – выхлопная труба;

6 – теплообменник-змеевик с охлаждающей жидкостью

**Рисунок 1 – Влияние утилизации теплоты ОГ на термодинамические параметры двигателя**

вого потока приводит к отрицательным последствиям: шум выпуска усиливается, растет противодавление. Данные на рисунке 1 подтверждаются и лабораторными исследованиями. Специально проведенные эксперименты на карбюраторном двигателе автомобиля типа ГАЗ-53 (8Ч 9,2/8,0) позволили установить, что снижение температуры ОГ на 90-110 К в глушителях шума обуславливает уменьшение уровня звукового давления на 5-6 дБ практически по всему диапазону изменения среднегеометрических частот от 63 до 8000 Гц. При этом, наибольший эффект достигается на низких частотах гармоники второго порядка, обладающей, как известно, максимальной звуковой мощностью и особенно трудно поддающейся каким-либо отклонениям от исходных параметров (звуковая энергия гармоник уменьшается с повышением их порядка). Одновременно был сделан химический анализ ОГ карбюраторного двигателя на содержание в них  $\text{NO}_x$ . Окисление  $\text{NO}$  до диоксида  $\text{NO}_2$  начинается в выпускном тракте двигателя, однако в связи с быстрой скоростью газов и их высокой температурой степень окисления не превышает 6-9 %. В этой связи охлаждение газов и торможение потока создают более благоприятные условия для окисления  $\text{NO}$  до  $\text{NO}_2$  и дальнейшей полимеризации диоксида  $\text{NO}_2$  до четырехоксида  $\text{N}_2\text{O}_4$  (при  $T < 427$  К).

Химический анализ, проведенный учреждением здравоохранения «Могилевский зональный центр гигиены и эпидемиологии», показал, что при среднем режиме работы карбюраторного ДВС в случае охлаждения ОГ приблизительно на 100 К содержание в них  $\text{NO}_2$  уменьшается в среднем с 12,8 до 8,5 мг/м<sup>3</sup>. При этом замечено, что чем интенсивнее охлаждение, тем эффективнее идет процесс окисления  $\text{NO}_x$ .

плотность) и на содержание  $\text{NO}_x$  при размещении утили-

зационного теплообменника на участке дозвуковых течений газа в системе выпуска ДВС, в частности, в резонансных камерах глушителя шума.

Здесь же показано влияние процессов утилизации на характеристики потока в случае отбора теплоты ОГ в сверхзвуковой области их истечения, т.е. ближе к клапанной щели, при  $Ma > 1$  (случай чисто теоретический) [5].

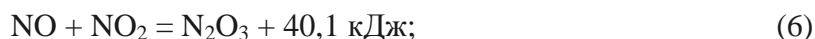
Как видно из рисунка 1, расположение утили-

зационного теплообменника на участке системы выпуска со сверхзвуковыми скоростями истечения газо-

Образование из NO высших окислов в процессе охлаждения потока ОГ происходит с выделением теплоты. Так, по данным работы [6], в реакции  $2\text{NO} + \text{O}_2 = 2\text{NO}_2$  выделяется 124 кДж теплоты. При дальнейшем охлаждении наблюдается полимеризация  $\text{NO}_2$ :



Одновременно в смеси наряду с  $\text{N}_2\text{O}_4$  образуется и  $\text{N}_2\text{O}_3$ :

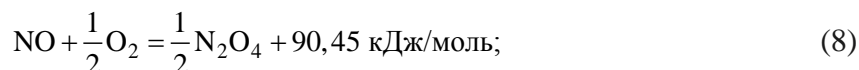


При недостатке кислорода или при неустановившемся равновесии в ОГ могут присутствовать одновременно все окислы азота: NO,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{N}_2\text{O}_3$  и  $\text{N}_2\text{O}_4$  (пятиокись при обычных условиях из этих окислов не образуется). В то же время для получения  $\text{N}_2\text{O}_4$  и  $\text{N}_2\text{O}_3$  обязательным условием является понижение температуры, а избыточный кислород в данном случае не требуется.

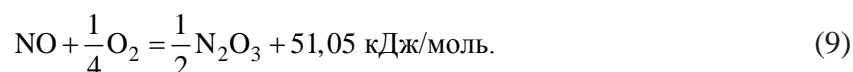
Оксид азота NO начинает восстанавливаться до двуокиси  $\text{NO}_2$  при температуре 583 К (310 °С), а при температуре ниже 473 К (200 °С) реакция окисления окиси азота (при давлении 1 атм.) протекает почти на 100 % [4]. Одновременно начинается полимеризация  $\text{NO}_2$  в  $\text{N}_2\text{O}_4$ , что в целом и подтверждают результаты химического анализа.

Таким образом, при пересчете на 1 моль оксида азота:

- при окислении до  $\text{N}_2\text{O}_4$  по пути (5), (6) эквивалентное уравнение реакции имеет вид:

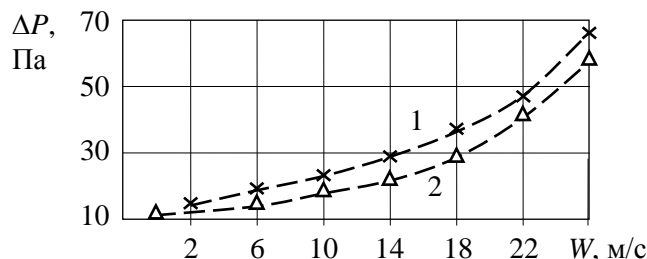


- при окислении до  $\text{N}_2\text{O}_3$  по пути (5), (7) эквивалентное уравнение реакции имеет вид:



Соответственно, реакция окисления только 1 моля оксида азота (при восстановлении NO до  $\text{NO}_2$ ,  $\text{N}_2\text{O}_4$  и  $\text{N}_2\text{O}_3$ ) происходит с выделением до 90,45 кДж теплоты [1], которая воспринимается охлаждающей средой в утилизационном теплообменнике.

Применительно к дозвуковой области течения ОГ было установлено и весьма существенное снижение давления  $P$  в выпускном патрубке. На рисунке 2 приведены экспериментальные данные по изменению величины гидравлического сопротивления в канале модели глушителя шума в зависимости от скорости движения газов для двух случаев: с охлаждением и без охлаждения. Охлаждение канала осуществлялось с помощью утилизационного теплообменника типа «греющая рубашка», т.е. геометрия канала оставалась неизменной. Это позволило практически реализовать в эксперименте эффект «чистого» охлаждения.



**Рисунок 2 – Экспериментальные данные по изменению величины гидравлического сопротивления в канале модели глушителя шума в зависимости от скорости движения газов для двух случаев: с охлаждением (2) и без охлаждения (1)**

канала оставалась неизменной. Это позволило практически реализовать в эксперименте эффект «чистого» охлаждения.

Из рисунка 2 следует, что интенсивное охлаждение участка канала модели глушителя оказывает довольно существенное влияние на потери давления. Так, например, при скорости газов  $W = 20$  м/с потери давления в охлаждаемом канале уменьшаются в среднем на 15 %, причем, характер кривых свидетельствует о том, что с ростом скорости

эта разница возрастает за счет интенсификации теплообмена при неизменном размере утилизационной поверхности нагрева. Перепад потока количества движения отражает потерю скоростного напора и возникает за счет перестройки профиля скорости, вызванного внешним охлаждением и увеличением плотности у стенки канала, а также релаксацией входного профиля скорости. При фиксированном расходе перепад давления характеризует работу сил давления и, следовательно, потери эффективной мощности двигателя. Таким образом, давление ОГ при их интенсивном охлаждении значительно снижается в выпускном патрубке, и выхлоп в этом случае производится в область более пониженного давления.

### Новые технические решения. Теплоутилизационная энергоустановка.

#### Теоретическое обоснование и экспериментальные данные

Энергоустановка предназначена для использования утилизированной энергии в процессах хранения, производства и транспортировки пищевых продуктов на спецавто-транспорте, эффективной очистки отработавших газов, существенного снижения уровня шума выпуска, уменьшения лобового аэродинамического сопротивления и повышения эффективных показателей работы ДВС. Энергоустановка устанавливается на спецавтомобили типа «Продукты», «Автомаргазин», «Автомастерская», «Цыплята», «Передвижная столовая», «Автофургон хлебный обогреваемый АФХО-131», «Походная передвижная кухня ПАК-200», «Кухня газовая КГ-30» и может использоваться на автопоездах-муковозах, автопоездах-рефрижераторах международного и междугороднего сообщения, дизелях общего назначения: тепловозных, судовых, дизель-электростанциях и т.п. На рисунке 3 представлена принципиально-конструктивная схема наземной энергетической автотранспортной установки.

Основу энергоустановки составляет глушитель шума 1 и полый эродинимический обтекатель – конденсатор 10, причем, глушитель 1 установлен вертикально между кабиной 12 и кузовом-фургоном 13 автотранспортного средства, а обтекатель 10 расположен наклонно под углом  $\alpha$  на крыше кабины 12. Глушитель 1 соединен с обтекателем 10 гибким шлангом (паропровод – конденсатопровод) 9. Внутри глушителя 1 размещены реактор 2 и на опоре 5 утилизационный теплообменник 4, выполненные в виде теплообменников-змеевиков [7]. Реактор 2 полностью засыпан гранулами катализатора:

оксидами меди или хрома, марганца, кобальта, ванадия, алюминия, железными опилками, платиной или палладием и т.п.

Реактор 2 и утилизационный теплообменник 4 заполнены промежуточным теплоносителем, устойчиво работающим в двухфазном состоянии жидкость-пар, например, вода, антифриз, высокотемпературные органические теплоносители: дитоллиметан, дикумилметан, дифенильная смесь. Заполнение системы осуществляется через воронку 11. С помощью кранов 3 выпускается воздух из внутренней полости змеевиков, устанавливается необходимый уровень и осуществляется слив промежуточного те-

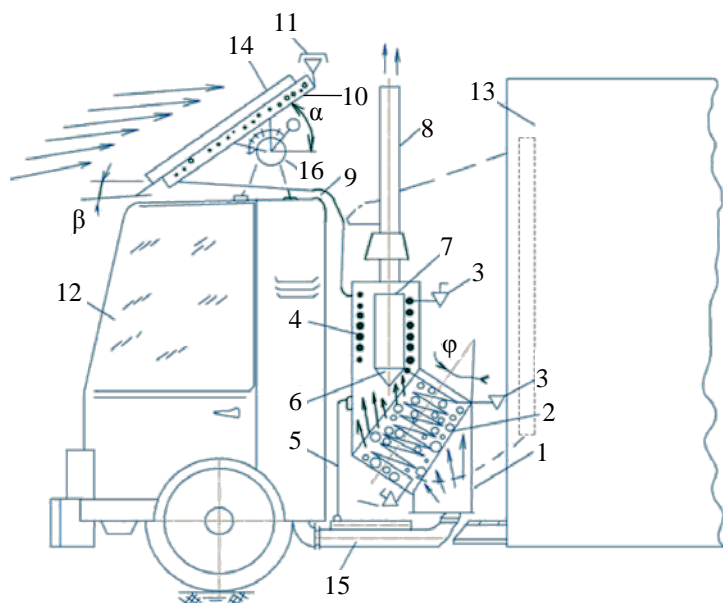


Рисунок 3 – Схема наземной автотранспортной энергетической установки с утилизацией теплоты отработавших газов ДВС по [8]-[19]

плоносителя. Утилизационный теплообменник 4 снабжен полым обтекателем 7 с коническим дефлектором 6. Угол наклона  $\alpha$  аэродинамического полого обтекателя 10 устанавливается специальным шарнирным механизмом 16 по принципу: зима - лето. Шланг 9 расположен в области кабины 12 под углом  $\beta = 15-20^\circ$ .

Реактор 2 может быть изготовлен из металлической трубы (монель-металлы, нержавеющая сталь, смесь оксидов металлов – хрома, меди, железа и др.) диаметром 1/2"; 3/4"; 1,0" и состоит из 10-12 витков с внешним диаметром 200-300 мм. Расстояние между витками змеевика реактора 2 определяется наименьшим размером гранул катализатора (2-3 мм). Торцевые стенки реактора 2 снабжены крышками для замены вышедшего из строя катализатора, очистки внутренних поверхностей от сажи, пыли, твердых осадков и т.п. Обтекатель 10 снабжен тепловыми ребрами 14.

Принцип действия энергоустановки заключается в следующем. При включении ДВС образующиеся отработавшие газы по трубе приемной 15 (рисунок 3) попадают в глушитель 1, проходят снизу вверх через зазоры между витками змеевика реактора 2, слой катализатора и далее направляются на охлаждение к утилизационному теплообменнику 4, после чего выводятся по трубе выхлопной 8 в окружающую среду. В реакторе 2 и утилизационном теплообменнике 4 отработавшие газы охлаждаются, их скорость, температура и давление падают. Но при этом промежуточный теплоноситель нагревается и превращается в пар, который по шлангу 9 (рисунок 3) поднимается вверх, входит в полый обтекатель 10 и конденсируется, поскольку последний интенсивно охлаждается встречным потоком воздуха. Образующийся конденсат стекает по шлангу 9 вниз снова в утилизационный теплообменник 4 и реактор 2, где опять превращается в пар.

Для правильно рассчитанной энергоустановки имеет место баланс энергии: подвод теплоты в глушителе 1 равен ее отводу в аэродинамическом обтекателе 10, и в этом случае выход пара из воронки 11 не наблюдается.

В реакторе 2 газы очищаются от CO и CH, а в зоне утилизационного теплообменника 4 осуществляется нейтрализация их по окислам азота NO<sub>x</sub>. Однако при интенсивном охлаждении скорость газов падает, и уровень звукового давления снижается. Чем интенсивнее охлаждение газового потока, тем эффективнее шумоглушение и выше степень очистки. Здесь важно, в частности, для долговечности конструкции реактора 2 и катализатора, что стенки реактора 2 охлаждаются, и это способствует стабилизации его теплового режима. По этой причине в качестве катализатора можно использовать низкотемпературные металлы вместо дорогой и дефицитной платины.

В реакторе 2 проходят основные химические реакции по окислению CO и CH. Имеет место и взаимодействие O с CO, присутствующей в ОГ:



Одновременно CO взаимодействует с водой H<sub>2</sub>O с образованием H<sub>2</sub>:



Однако образующийся H<sub>2</sub> реагирует с NO с образованием аммиака NH<sub>3</sub> и воды H<sub>2</sub>O:



и в дальнейшем NH<sub>3</sub> повторно окисляется до NO [4].

Таким образом, каталитический нейтрализатор эффективно работает по окислению CO и C<sub>m</sub>H<sub>n</sub>, но при этом содержание NO в газе увеличивается. Реакции окисления в реакторе идут с выделением теплоты, что приводит к возрастанию температуры га-

за и соответственно всего реактора. Верхний предел температур в известных решениях может достигать 1073-1173 К и даже 1273-1373 К. При таком режиме работы катализатор слипается, спекается, стенки реактора прогорают и нейтрализатор выходит из строя.

Одновременно возрастает скорость движения газов и, как следствие, увеличивается шум. Однако в данном случае реактор 2 интенсивно охлаждается, так как по теплообменнику-змеевику циркулирует охлаждающая жидкость, например, вода или антифриз. В реакторе 2 охлаждающая жидкость нагревается, а в аэродинамическом полове обтекателе 10 с помощью встречного потока воздуха охлаждается, при этом имеет место конденсация охлаждающей жидкости. Охлаждение реактора способствует стабилизации его работы, ограничивает верхний и нижний пределы температур, снижает неравномерность температуры по всему объему катализатора, препятствует спеканию гранул между собой и прилипанию их к стенкам реактора 2. Реактор 2, выполненный в виде теплообменника-змеевика, выполняет также функции теплового аккумулятора, что ценно в период холостого режима работы ДВС, когда температура ОГ недостаточна для химического взаимодействия с катализатором. При усиленных режимах работы двигателя, когда температуры ОГ резко поднимается, реактор 2 служит тепловым буфером, воспринимая первым пульсирующий мощный поток газов, обладающий огромной кинетической и тепловой энергией. При этом гидравлическое сопротивление самого реактора 2 за счет наклона под углом  $\varphi$  продольно расположенных витков и сквозных щелей незначительно, а эффективность перемешивания газового потока с катализатором хорошая. В качестве оптимального следует признать угол наклона  $\varphi = 45^\circ$ , при котором имеет место равенство значений гидравлического сопротивления на входной и выходной сторонах реактора. Это способствует выравниванию температурного поля по объему реактора, стабилизации и эффективности его работы. В то же время интенсивное охлаждение газового потока, особенно на выходе из реактора, приводит к падению его скорости и, как следствие, к снижению уровня шума. Отметим также, что витки змеевика реактора 2 имеют возможность незначительного взаимного перемещения в момент их нагревания или охлаждения – этим самым осуществляется компенсация возникающих температурных деформаций в конструкции реактора.

Однако чем эффективнее проходят положительные химические процессы внутри реактора, тем больше выделяется теплоты и выше поднимается температура ОГ, и тем значительнее в них содержание низших окислов азота, особенно NO. С целью нейтрализации за реактором ОГ по содержанию в них оксидов азота (в основном NO и NO<sub>2</sub>) в конструкции нейтрализатора применен утилизационный теплообменник 4, имеющий вид змеевика (как один из вариантов). Теплообменник 4 дополнительно утилизирует теплоту ОГ, в том числе и теплоту от реакции окисления окислов азота. Понижение температуры ОГ за реактором способствует увеличению скорости окисления NO до NO<sub>2</sub> и дальнейшей полимеризации NO<sub>2</sub> до N<sub>2</sub>O<sub>4</sub> при выделении значительного количества теплоты.

Из сказанного следует, что реактор нейтрализатора и утилизационный теплообменник, установленный за реактором и подключенный к последнему, испытывают сильное тепловое воздействие, при этом имеет место, с одной стороны, подвод теплоты от протекающих химических реакций  $dq_{\text{хим}}$  ( $dq_{\text{хим}} > 0$ ), с другой – отвод теплоты с охлаждающей жидкостью  $dq_{\text{вн}}$  ( $dq_{\text{вн}} < 0$ ).

Здесь необходимо рассмотреть два случая.

1. Если  $dq_{\text{хим}} > dq_{\text{вн}}$ , т.е.  $dq_{\text{хим}} + dq_{\text{вн}} > 0$ , то согласно газодинамической теории Вулеса (закона обращения воздействий) в дозвуковом потоке температура ОГ повышается, скорость их движения возрастает и, как следствие, увеличивается уровень шума выпуска.



2. Если  $dq_{\text{хим}} < dq_{\text{вн}}$ , т.е.  $dq_{\text{хим}} + dq_{\text{вн}} < 0$ , то имеет место обратная картина: температура ОГ уменьшается, скорость их движения падает, и, как следствие, уровень шума выпуска снижается.

Отсюда следует, что нормальная работа такого комбинированного каталитического нейтрализатора обеспечивается условием:  $dq_{\text{вн}} + dq_{\text{хим}} < 0$  при  $Ma < 1$ , где  $Ma = W/a$  – число Маха ( $W$  – скорость движения ОГ, м/с;  $a$  – скорость звука в газе, м/с).

Расчеты показали, что при интенсивном местном охлаждении число  $Ma$  уменьшается в пределах от 0,25 до 0,15 по мере увеличения коэффициента утилизации с 0,236 до 0,354 (применительно к размерам серийных глушителей). Это обстоятельство и было учтено при расчете поверхности нагрева конструкции нейтрализатора с двухступенчатой утилизацией теплоты ОГ, работающего одновременно в трех режимах:

- трехкомпонентного каталитического нейтрализатора;
- эффективного глушителя шума;
- компактного утилизационного теплообменника.

Положительное влияние охлаждения ОГ с помощью теплообменника было подтверждено и экспериментально при испытаниях серийного карбюраторного двигателя автомобиля ГАЗ-53.

Охлаждение способствует существенному снижению в ОГ содержания  $\text{NO}$  и  $\text{NO}_2$ , а также их суммы. Это объясняется тем, что со снижением температуры и скорости движения газов время окисления окислов азота увеличивается, степень окисления возрастает и большая часть  $\text{NO}$  переходит в  $\text{NO}_2$ , но одновременно и  $\text{NO}_2$  полимеризуется в  $\text{N}_2\text{O}_4$ , причем, чем интенсивнее охлаждение потока, тем активнее происходят окислительные процессы в ОГ.

Экспериментальные данные также показали, что с переходом на усиленный режим работы двигателя (без нагрузки) содержание  $\text{NO}_2$  в среднем увеличивается с 9,22 до 11,04 мг/м<sup>3</sup>. Однако более интенсивное охлаждение газов при среднем режиме работы двигателя позволяет значительно уменьшить содержание  $\text{NO}_2$  в ОГ. Так, например, охлаждение газов при холостом режиме на 40 °С снижает содержание  $\text{NO}_2$  с 9,22 до 8,31 мг/м<sup>3</sup>, а уже охлаждение при среднем режиме на 80 °С снижает его с 11,04 до 7,17 мг/м<sup>3</sup>.

Отсюда можно сделать вывод, что при наиболее интенсивном охлаждении газов возможно снижение содержания в них  $\text{NO}_2$  до величины, принятой стандартом ПДК (предельно допустимые концентрации) (до 5 мг/м<sup>3</sup>), т.е. изменяя тепловую нагрузку нейтрализатора, регулируем тем самым содержание одного из главных токсичных компонентов  $\text{NO}_2$  в ОГ. Одновременно утилизационный теплообменник 4 поддерживает тепловой режим работы реактора 2, что очень важно для его стабильной работы, особенно в момент изменения режима работы ДВС. Тепловая нагрузка нейтрализатора (степень утилизации энергии газов) зависит от площадей поверхностей нагрева змеевика реактора 2  $F_p$  и утилизационного теплообменника 4  $F_y$ . Площадь поверхности нагрева нейтрализатора определяется из теплового расчета в зависимости от предъявляемых требований с учетом коэффициента утилизации, однако можно принять  $F_p = 2F_y$ .

**Эффективность шумоглушения.** Необходимо также отметить повышение эффективности шумоглушения путем охлаждения ОГ в реакторе и в теплообменнике, которые имеют место в данной конструкции нейтрализатора. Так, например, охлаждение потока газов только в теплообменнике на 80 °С приводит к снижению уровня звукового давления (по экспериментальным данным) на 4,0 дБ в среднем по всему среднегеометрическому спектру частот от 63 до 8000 Гц.

**Эффективные показатели ДВС.** Следует отметить, что оптимальное интенсивное охлаждение ОГ обуславливает падение давления (уменьшение противодавления сис-

темы выпуска), увеличение плотности и обеспечивает так называемый эффект теплового торможения газового потока, что в целом и повышает эффективные показатели ДВС.

Эффект теплового торможения имеет место как в самом реакторе 2, так и в зоне размещения дополнительного теплообменника-змеевика 4 (рисунок 3). В этом случае вследствие увеличения плотности ОГ и уменьшения скорости их движения при условии  $dq_{хим} + dq_{вн} < 0$ , т.е. при охлаждении потока, наблюдается отрицательная потеря давления на торможение газа  $\Delta P_T$ , которая при движении в канале постоянного сечения равна удвоенной разности скорости напоров, т.е.:

$$\Delta P_T = 2 \left( \frac{\rho_2 W_2^2}{2} - \frac{\rho_1 W_1^2}{2} \right) = \rho_2 W_2^2 - \rho_1 W_1^2, \quad (14)$$

где  $\rho_1$  и  $W_1$ ,  $\rho_2$  и  $W_2$  – плотности и скорости газа в начале и в конце охлаждаемого канала.

При охлаждении  $\rho_2 > \rho_1$ ,  $W_2 < W_1$ ,  $W_2^2 \ll W_1^2$ , однако плотность увеличивается незначительно по сравнению с уменьшением скорости. Значит  $\rho_2 W_2^2 < \rho_1 W_1^2$ . Следовательно,  $\Delta P_T$  отрицательно, т.е. потери давления в охлаждаемом канале меньше, чем потери давления в том же канале, но без охлаждения. Это было подтверждено и экспериментально: уменьшение величины противодавления участка выхлопной трубы с размещенным внутри теплообменником-змеевиком достигает 10-16 % в зависимости от интенсивности охлаждения (по сравнению с этим же участком, но без охлаждения).

Этим же можно компенсировать потери давления от установки теплообменника-змеевика 4. Однако в качестве утилизационного теплообменника можно использовать теплообменник типа «греющая рубашка».

В то же время, если  $dq_{вн} < dq_{хим}$ , т.е.  $dq_{вн} + dq_{хим} > 0$ , то будет иметь место дополнительная потеря давления на ускорение газа, которая в случае нагревания газа положительна. Значит, противодавление участка выхлопной трубы увеличивается, мощность на прокачку газов возрастает, и эффективные показатели ДВС ухудшаются.

**Эффективная мощность.** Эффективная мощность двигателя зависит от многих факторов и может быть повышена, в частности, путем повышения коэффициента наполнения и снижения сопротивления на выпуске. В этой связи необходимо рассмотреть влияние процессов охлаждения ОГ на следующие оценочные параметры:

- давление остаточных газов;
- температуру остаточных газов;
- коэффициент остаточных газов;
- коэффициент наполнения.

**Давление остаточных газов.** Величина давления остаточных газов в цилиндре двигателя перед началом процесса наполнения определяется, в частности, гидравлическим (аэродинамическим) сопротивлением впускного и выпускного трактов. Охлаждение ОГ в выпускном тракте обуславливает снижение его гидравлического сопротивления на 10-15 %, следовательно, давление остаточных газов в камере сгорания перед процессом наполнения уменьшается.

**Температура остаточных газов  $T_r$ .** Значение температуры остаточных газов в случае охлаждения ОГ в выпускном тракте будет снижаться и, тем самым, положительно влиять на наполнение цилиндров свежим зарядом за счет повышения его плотности.

**Коэффициент остаточных газов  $\Psi_r$ .** Коэффициент остаточных газов характеризует качество отсечки цилиндров от продуктов сгорания топлива и определяется по известной формуле (без учета дозарядки и продувки цилиндра):

$$\Psi_r = \frac{T_b + \Delta T}{T_r} \cdot \frac{P_r}{\varepsilon P_a - P_r}, \quad (15)$$

где  $T_b$  – температура окружающей среды, К;  
 $\Delta T$  – величина подогрева свежего заряда, К;  
 $P_r$  – давление ОГ, Па;  
 $\varepsilon$  – степень сжатия;  
 $P_a$  – давление в конце впуска, Па.

Так как охлаждение выпускного трубопровода связано с падением величины давления  $P_r$ , то коэффициент  $\Psi_r$  в этом случае уменьшается, и количество свежего заряда в процессе впуска увеличивается.

**Коэффициент наполнения  $\Phi_\sigma$ .** Установим связь коэффициента наполнения с процессом охлаждения потока ОГ. Для четырехтактных двигателей без учета продувки и дозарядки коэффициент наполнения определяется по известной формуле [20]:

$$\Phi_\sigma = \frac{T_b}{T_b + \Delta T} \cdot \frac{1}{\varepsilon - 1} \cdot \frac{1}{P_b} (\varepsilon P_a - P_r), \quad (16)$$

где  $P_b$  – давление окружающей среды, Па.

Из этой формулы следует, что  $\Phi_\sigma$  возрастает с увеличением давления в конце впуска  $P_a$  и понижается с увеличением давления выпуска  $P_r$ . Однако при охлаждении отработавших газов давление  $P_r$  уменьшается, следовательно  $\Phi_\sigma$  – увеличивается.

#### **Заключение**

Рассмотрено влияние процессов утилизации отработавших газов на термодинамическую эффективность и эксплуатационные характеристики энергосиловых установок. Установлено, что при условии внешнего теплового воздействия на поток отработавших газов и отсутствии технической работы температура газов снижается, их плотность возрастает, давление падает, которое, в свою очередь, приводит к уменьшению скорости и снижению уровня шума. Показано положительно влияние процессов утилизации энергии отработавших газов на токсичность: при среднем режиме работы карбюраторного двигателя при охлаждении газов на 100 К содержание в них  $\text{NO}_2$  уменьшается в среднем с 12,8 до 8,5 мг/м<sup>3</sup>, и на эффективные показатели работы двигателя: эффективную мощность, давление остаточных газов, температуру остаточных газов, коэффициент остаточных газов и коэффициент наполнения. Расчеты показали, что при интенсивном местном охлаждении число Маха уменьшается в пределах от 0,25 до 0,15 по мере увеличения коэффициента утилизации от 0,236 до 0,354 применительно к размерам серийных глушителей шума.

#### **Список использованных источников**

1. Груданов В.Я., Ткачева Л.Т., Белохвостов Г.И. и др. Влияние процессов утилизации энергии отработавших газов поршневых двигателей внутреннего сгорания на газодинамические и акустические характеристики глушителей шума // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Сер. фізіка-тэхнічных навук. – 2022. – Т. 67, № 3. – С. 307-317.
2. Кириллин В.А., Сычев В.В., Шейндлин А.Е. Техническая термодинамика. – М.: Энергия, 1974. – 448 с.
3. Вулис Л.А. Термодинамика газовых потоков. – М.: Госэнергоиздат, 1950. – 303 с.
4. Атрощенко В.И. Технология азотной кислоты. – М.: Химия, 1970. – 496 с.
5. Груданов В.Я., Ткачева Л.Т. Утилизацио-комбинированная система отопления // Автомобильный транспорт. – 1989. – № 12. – С. 28-29.
6. Жегалин О.Н., Лупачев П.Д. Снижение токсичности автомобильных двигателей. М.: Транспорт, 1985. – 120 с.
7. Груданов В.Я. Физико-химические и теплообменные процессы в каталитических нейтрализаторах с утилизацией теплоты отработавших газов // Двигателестроение. – 1991. – № 1. – С. 47-49.

8. СССР а.с. 1230869 Отопительное устройство автотранспортного средства В60. – 1986.
9. СССР а.с. 1365799 Глушитель шума для двигателя внутреннего сгорания F01. – заявл. 1986.
10. СССР а.с. 1380353 Глушитель шума для двигателя внутреннего сгорания F01. – заявл. 1986.
11. СССР а.с. 1501621 Глушитель шума двигателя внутреннего сгорания F01. – заявл. 1987.
12. СССР а.с. 1538616 Глушитель шума для двигателя внутреннего сгорания F01. – заявл. 1988.
13. СССР а.с. 1563297 Глушитель шума двигателя внутреннего сгорания F01. – заявл. 1988.
14. СССР а.с. 1590579 Каталитический нейтрализатор отработавших газов F01. – 1990.
15. СССР а.с. 1605644 Глушитель шума для двигателя внутреннего сгорания F01. – заявл. 1989.
16. СССР а.с. 1612672 Глушитель шума для двигателя внутреннего сгорания F01. – заявл. 1989.
17. СССР а.с. 1612673 Глушитель шума для двигателя внутреннего сгорания F01. – заявл. 1989.
18. СССР а.с. 1654031 Отопитель транспортного средства В60. – 1991.
19. СССР а.с. 1665050 Глушитель шума для двигателя внутреннего сгорания F01. – 1991.
20. Колчин А.И., Демидов В.П. Расчет автомобильных и тракторных двигателей. – М.: Высшая школа, 1971. – 344 с.

#### Информация об авторах

*Владимир Яковлевич Груданов* – доктор технических наук, профессор, УО «Белорусский государственный аграрный технический университет» (пр. Независимости, 99, 220023, г. Минск, Беларусь), e-mail: rektorat@bsatu.by.

*Людмила Тимофеевна Ткачева* – кандидат технических наук, доцент, УО «Белорусский государственный аграрный технический университет» (пр. Независимости, 99, 220023, г. Минск, Беларусь), e-mail: l.t.tkacheva.uot@bsatu.by.

*Геннадий Иванович Белохвостов* – кандидат технических наук, доцент, УО «Белорусский государственный аграрный технический университет» (пр. Независимости, 99, 220023, г. Минск, Беларусь), e-mail: rektorat@bsatu.by.

#### Information about the authors

*Vladimir Yakovlevich Grudanov* – D. Sc. (Engineering), Professor, Belarusian State Agrarian Technical University (99, Nezavisimosti Ave., 220023, Minsk, Belarus), e-mail: rektorat@bsatu.by.

*Ludmila Timofeevna Tkacheva* – Ph. D. (Engineering), Associate Professor, Belarusian State Agrarian Technical University (99, Nezavisimosti Ave., 220023, Minsk, Belarus), e-mail: l.t.tkacheva.uot@bsatu.by.

*Guennadi Ivanovich Belokhvostov* – Ph. D. (Engineering), Associate Professor, Belarusian State Agrarian Technical University (99, Nezavisimosti Ave., 220023, Minsk, Belarus), e-mail: rektorat@bsatu.by.

Поступила в редакцию 25.11.2022 г.