

Б.Г. Тимошевский, М.Р. Ткач, А.С. Митрофанов, А.С. Познанский, А.Ю. Проскурин

ПОКАЗАТЕЛИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДВИГАТЕЛЯ С ИСКРОВЫМ ЗАЖИГАНИЕМ 2Ч 7,2/6 ПРИ РАБОТЕ НА СИНТЕЗ-ГАЗЕ

Представлены результаты экспериментальных исследований работы двигателя с искровым зажиганием и внешним смесеобразованием при работе на синтез-газе, полученном путем паровой конверсии биоэтанола. Получены зависимости изменения параметров работы двигателя по нагрузочной характеристике, а также индикаторные диаграммы при работе на бензине, пропане и синтез-газе. Показано влияние коэффициента избытка воздуха на изменение давления в цилиндре при работе двигателя на синтез-газе.

Постановка проблемы

Ограниченность запасов ископаемых ресурсов обуславливает необходимость применения альтернативного топлива в транспортных установках.

На ближайшие десятилетия для малых и средних транспортных и стационарных установок одним из перспективных типов двигателей являются ДВС с принудительным искровым зажиганием. В связи с этим, основной задачей становится обеспечение эффективной работы двигателей, использующих альтернативные виды топлива.

Анализ исследований и публикаций

В связи с достаточно широкой сырьевой базой наибольший интерес представляет применение в ДВС водорода и водородосодержащего синтез-газа [1, 2]. Синтез-газ может быть получен из разного вида сырья, например, путем газификации угля, паровой конверсии различных углеводородов (метилового и этилового спиртов, метана и т. д.). В большей степени синтез-газ представляет собой смесь CO и H_2 , однако в зависимости от условий получения и применяемого сырья в его состав может входить и ряд других компонентов. Именно состав и определяет отличительные особенности организации рабочего цикла ДВС [3]. Так, при работе с высоким содержанием водорода (67...100 % H_2 по объему) для эффективной работы двигателя необходимо учитывать влияние ряда параметров, таких, как коэффициент избытка воздуха, угол опережения зажигания, степень сжатия, коэффициент наполнения цилиндра, фазы газораспределения, способ смесеобразования (внешнее, внутреннее) [4–7].

В результате изучения отечественной и зарубежной литературы не удалось обнаружить достаточно надежных экспериментальных и теоретических данных об особенностях организации рабочего цикла двигателей, работающих на синтез-газе.

Цель работы – исследовать параметры работы двигателя с искровым зажиганием, а также особенности процесса сгорания при использовании синтез-газа, полученного путем паровой конверсии биоэтанола.

Изложение основного материала

Одним из методов исследования является физическое моделирование, которое позволяет получить достаточно точные результаты.

Процессы смесеобразования и сгорания синтез-газа в цилиндре двигателя требуют дальнейшего теоретического и экспериментального исследования для определения рациональных параметров рабочего цикла, которые обеспечили наиболее выгодное сочетание расхода топлива, мощности двигателя, эффективных и экологических показателей ДВС.

С целью детального изучения этих процессов была разработана и создана экспериментальная установка на базе двигателя 2Ч 7,2/6. Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1, фотография на рис. 2.

Экспериментальная установка состоит из трех подсистем:

- подсистема (на базе двигателя с искровым зажиганием 2Ч 7,2/6) для исследования параметров рабочего процесса ДВС, работающего на синтез-газе;
- подсистема измерений;
- подсистема автоматики и регулирования.

Для проведения экспериментальных исследований рабочего процесса ДВС с искровым зажиганием, работающего на синтез-газе, был разработан стенд на базе двигателя УД-25 (2Ч 7,2/6) с внешним смесеобразованием, работающий на трехфазный генератор переменного тока.

Из баллонов 1 суммарным объемом 300 литров, расположенных в отдельном помещении, синтез-газ поступал в общий ресивер 2 и через редуктор низкого давления 5 (модель 2101-4442) и счетчик газа 7 (Gallus 2000) – в двигатель 10. Двигатель 2Ч 7,2/6 нагружался штатным трехфазным электрогенератором переменного тока, работающим на активную нагрузку 15. Значения тока и напряжения определялись в каждой фазе отдельно при помощи вольтметра 16 и амперметра 17 (M1107). Расход воздуха на входе в двигатель определялся при помощи расходомерной шайбы (лемнискаты) 26 с U-образным манометром 27 для фиксации перепада давления.

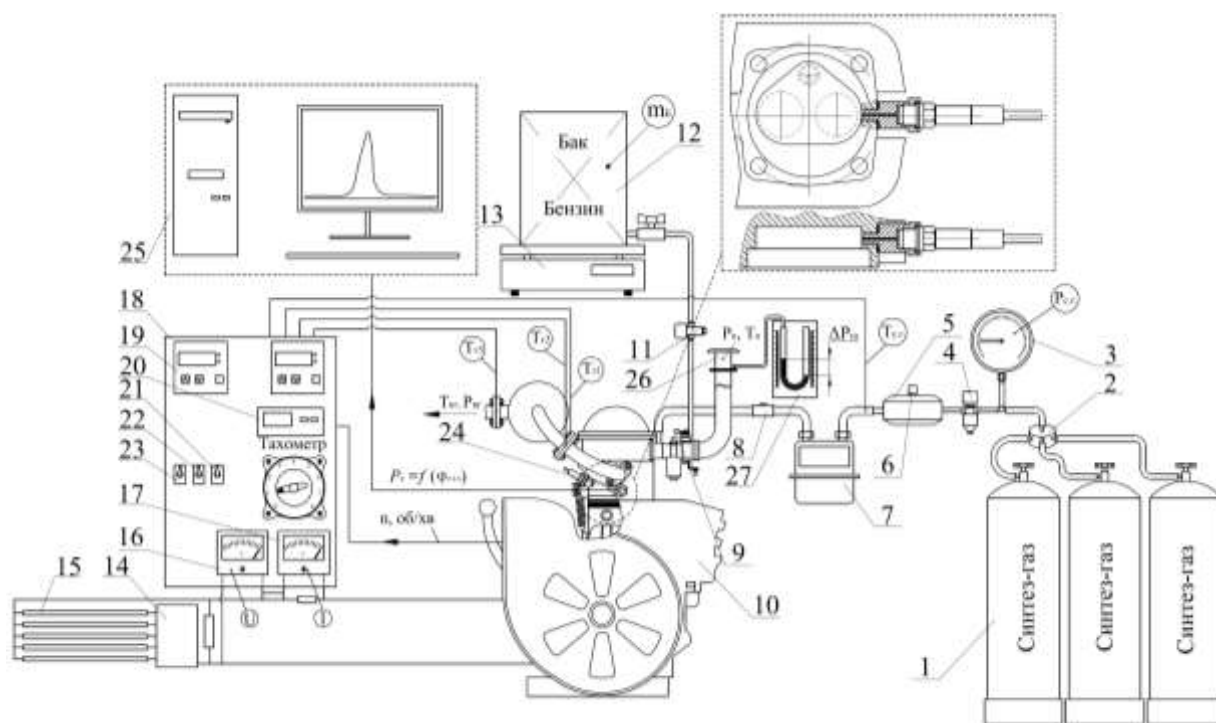


Рис. 1. Схема экспериментальной установки на базе двигателя 2Ч 7,2/6:

1 – баллоны с синтез-газом; 2 – общий ресивер; 3 – манометр; 4 – электромагнитный газовый клапан с фильтром; 5 – редуктор низкого давления; 6 – электромагнитный клапан; 7 – газовый счетчик; 8 – регулятор качества смеси; 9 – дроссельная заслонка; 10 – двигатель с искровым зажиганием 2Ч 7,2 / 6; 11 – электромагнитный бензиновый клапан; 12 – бак с топливом; 13 – весы; 14 – система управления нагрузкой; 15 – блок нагрузки; 16 – вольтметр; 17 – амперметр; 18 – панель приборов; 19 – прибор 2TRM1; 20 – тахометр; 21 – тумблер включения бензинового электромагнитного клапана; 22 – тумблер включения электромагнитного газового клапана; 23 – тумблер включения электромагнитного газового пускового клапана; 24 – датчик давления; 25 – ПК; 26 – расходомерная шайба; 27 – U-образный манометр

Для регистрации индикаторных диаграмм чувствительный элемент 24 датчика Kistler 7613C (рис. 3) был максимально приближен к камере сгорания.



Рис. 2. Экспериментальная установка на базе двигателя с искровым зажиганием 2Ч 7,2/6



Рис. 3. Датчик давления Kistler 7613C

Датчик был ввернут в головку двигателя через переходник (рис. 4). При этом степень сжатия в цилиндре уменьшилась на 0,3 %. Результаты замеров индикаторного давления передавались и обрабатывались на компьютере 25.



Рис. 4. Камера сгорания двигателя 2С 7,2/6

В условиях эксперимента при испытаниях двигателя 2С 7,2/6 на бензине, пропане и синтез-газе плотностью $0,63 \text{ кг/м}^3$ (43 % водорода, 34 % оксида углерода, 23 % метана) получены зависимости изменения основных параметров работы двигателя от электрической мощности генератора при работе по нагрузочной характеристике (рис. 5). Как пример, на рис. 6, а и б приведены снятые индикаторные диаграммы при различной мощности для бензина и пропана, а на рис. 6, в – при различных значениях коэффициента избытка воздуха для синтез-газа. Частота оборотов коленчатого вала двигателя составляла $n = 3000 \text{ об/мин}$.

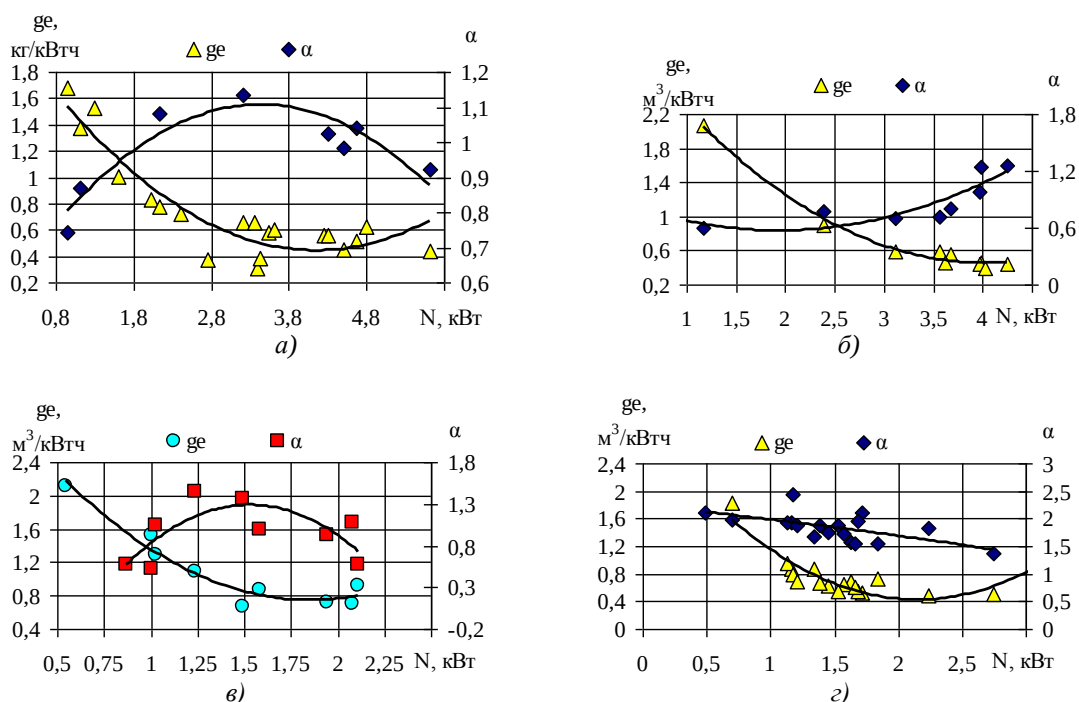


Рис. 5. Параметры работы двигателя по нагрузочной характеристике:
а – бензин; б – пропан; в – синтез-газ при $\alpha = 1,00 \dots 1,45$; г – синтез-газ при $\alpha = 1,38 \dots 2,44$

Вследствие значительного содержания водорода в составе синтез-газа существенно увеличиваются пределы воспламенения топливовоздушной смеси. Так, при работе двигателя с коэффициентом избытка воздуха $\alpha = 1,00 \dots 1,25$ наблюдается более жесткая работа, а также происходит смещение максимума сгорания в сторону ВМТ. Нормальная работа двигателя обеспечивается при использовании $\alpha = 1,35 \dots 1,75$.

При работе двигателя на синтез-газе вследствие значительного содержания водорода увеличиваются пределы воспламенения топливовоздушной смеси. Это, в свою очередь, приводит к увели-

чению индикаторного КПД и снижению расхода топлива.

Так, на основе обработки индикаторных диаграмм индикаторный КПД увеличивается с 0,33 на бензине и 0,31 на пропане до 0,36 на синтез-газе (вырос на 9,1 %). Увеличение индикаторного КПД цикла при увеличении α связано, прежде всего, со снижением теплоемкости и теплосодержания продуктов сгорания, что, в свою очередь, уменьшает долю термодинамических потерь [8].

Увеличение α при использовании синтез-газа приводит также к некоторому снижению температуры ОГ, что, в свою очередь, положительно влияет на экологические показатели ДВС.

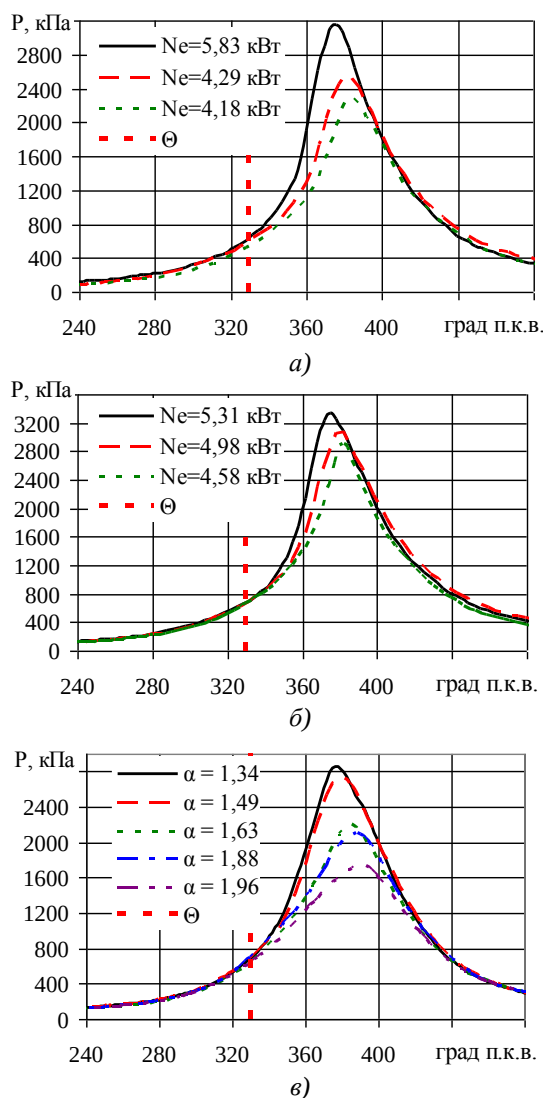


Рис. 6. Экспериментальные индикаторные диаграммы двигателя 24 7,2/6:
а – бензин; б – пропан; в – синтез-газ; Θ – угол опережения зажигания

Выводы

1. Для принятых условий эксперимента установлено, что вследствие низкой теплотворной способности синтез-газа и малой плотности водорода, доля которого в составе синтез-газа значительная, наблюдается уменьшение мощности двигателя до 40 % по сравнению с использованием бензина в качестве топлива.

2. При работе двигателя на синтез-газе вследствие значительного содержания водорода увеличивается индикаторный КПД с 0,33 на бензине и 0,31 на пропане до 0,36 на синтез-газе (на 9,1 %).

3. Увеличение α при использовании синтез-газа приводит к некоторому снижению температуры ОГ, что, в свою очередь, также положительно

влияет на экологические показатели ДВС. Значение температуры отработавших газов при использовании бензина и синтез-газа находятся в пределах, достаточных для обеспечения протекания реакции конверсии различных топлив и получения синтез-газа.

Список литературы:

1. Данилов, А. М. Альтернативные топлива: достоинства и недостатки. Проблемы применения [Текст] / А. М. Данилов, Э. Ф. Каминский, В. А. Хавкин // Рос. химический журнал об-ва им. Д.И. Менделеева. – 2003. – Т. 47, № 6. – С. 4–11.
2. Шкалова, В. П. Применение нетрадиционных топлив в дизелях [Текст] / В. П. Шкалова. – М.: НИИД, 1986. – 85 с.
3. Каменев, В. Ф. Теоретические и экспериментальные исследования работы двигателя на дизельно-водородных топливных композициях [Текст] / В. Ф. Каменев, В. М. Фомин, Н. А. Хрипач // Альтернативная энергетика и экология. – 2005. – №7(27). – С. 32–42.
4. Анализ и математическое моделирование процесса сгорания водорода в четырехтактном одноцилиндровом двигателе с искровым воспламенением [Текст] / А. П. Марченко, А. А. Осетров, И. Дубей, Р. Маамри // Двигатели внутреннего сгорания. – 2010. – № 1. – С. 24–28.
5. Shudo, T. Influence of Reformed Gas Composition on HCCI Combustion of Onboard Methanol-Reformed Gases [Text] / T. Shudo, T. Takahashi // SAE Technical Paper Series. – 2004. – 8–10 June. – P. 23–31.
6. Shudo, T. Combustion Characteristics of H_2 -CO-CO₂ Mixture in an IC Engine [Text] / T. Shudo, K. Tsuga, Y. Nakajima // SAE Technical Paper Series. – 2001. – 5–8 March. – P. 105–115.
7. Verhelst, S. A study of the combustion in hydrogen-fuelled internal combustion engines [Text] / S. Verhelst / Department of Flow, Heat and Combustion Mechanics, Ghent University. – Belgium: Ghent University, 2005. – 222 p.
8. Генкин, К. И. Газовые двигатели [Текст] / К. И. Генкин. – М.: Машиностроение, 1977. – 196 с.

Bibliography (transliterated):

1. Danilov, A.M. Alternativnye topliva: dostoinstva i nedostatki. Problemy primeneniya [Tekst] / A.M. Danilov, E.F. Kaminskiy, V.A. Xavkin //Ros. ximicheskij gurnal ob-va im. D.I. Mendeleeva. – 2003. – T. 47, № 6. – S. 4–11.
2. Shkalov, V.P. Primenenie netraditsionnykh topliv v dizelyx [Tekst] / V.P. Shkalov. – M.: NIAD, 1986. – 85 s.
3. Kamenev, V.F. Teoreticheskie i eksperimentalnye issledovaniya raboty dvigatelya na diesel-vodorodnykh toplivnykh kompozitsiyah [Tekst] / V.F. Kamenev, V.M. Fomin, N.A. Hrypach // Alternativnaya Energetika i Ecologiy. . – 2005. – №7(27). – S. 32–42.
4. Analys i matematicheskoe modelirovanie processa sgoraniya vodoroda v chetyrextaktnom odnolindrovom dvigatele s iskrovyim vosplamneniem [Text] / A.P. Marchenko, A.A. Ostetrov I. Dubey, R. Maamry // Dvigateli vnutrennego sgoraniya. – 2010. – № 1. – S. 24–28.
5. Shudo, T. Influence of Reformed Gas Composition on HCCI Combustion of Onboard Methanol-Reformed Gases [Text] / T. Shudo, T. Takahashi // SAE Technical Paper Series. – 2004. – 8–10 June. – P. 23–31.
6. Shudo, T. Combustion Characteristics of H_2 -CO-CO₂ Mixture in an IC Engine [Text] / T. Shudo, K. Tsuga, Y. Nakajima // SAE Technical Paper Series. – 2001. – 5–8 March. – P. 105–115.
7. Verhelst, S. A study of the combustion in hydrogen-fuelled internal combustion engines [Text] / S. Verhelst / Department of Flow, Heat and Combustion Mechanics, Ghent University. – Belgium: Ghent University, 2005. – 222 p.
8. Genkin, K. I. Gazovye dvigateli [Text] / K.I. Genkin. – M: Mashinostroenie, 1977. – 196 s.

Тимошевский Борис Георгиевич – доктор техн. наук, профессор, заведующий кафедрой двигателей внутреннего сгорания Национального университета кораблестроения им. адм. Макарова, Николаев, Украина, e-mail: btym@mksat.net, (050) 948-22-22.

Ткач Михаил Романович – доктор техн. наук, профессор, заведующий кафедрой теоретической механики Национального университета кораблестроения им. адм. Макарова, Николаев, Украина, e-mail: tkach@mksat.net, (050) 521-93-80.

Митрофанов Александр Сергеевич – ассистент кафедры двигателей внутреннего сгорания Национального университета кораблестроения им. адм. Макарова, Николаев, Украина, e-mail: m.aleksandr.s@mail.ru, (063) 021-30-93.

Познанский Андрей Станиславович – ассистент кафедры теоретической механики Национального университета кораблестроения им. адм. Макарова, Николаев, Украина, e-mail: AndPozn@yandex.ru, (096) 968-51-24.

Проскурин Аркадий Юрьевич – ассистент кафедры двигателей внутреннего сгорания Национального университета кораблестроения им. адм. Макарова, Николаев, Украина, e-mail: mover@ukr.net, (093) 204-80-26.

ПОКАЗНИКИ РОБОТИ ДВИГУНІВ З ІСКРОВИМ ЗАПАЛЮВАННЯМ 2Ч 7,2/6 ПРИ РОБОТІ НА СИНТЕЗ-ГАЗІ

Б.Г. Тимошевський, М.Р. Ткач, О.С. Митрофанов, А.С. Познанський, А.Ю. Проскурін

Наведені результати експериментальних досліджень роботи двигуна з іскровим запаленням та зовнішнім сумішоутворенням при роботі на синтез-газі, який отримано шляхом парової конверсії біоетанолу. Отримано залежності зміни параметрів роботи двигуна по навантажувальній характеристиці, а також індикаторні діаграми при роботі на бензині, пропані та синтез-газі. Показано вплив коефіцієнта надлишку повітря на зміну тиску в циліндрі при роботі двигуна на синтез-газі.

INDICATORS OF SPARK IGNITION ENGINE 2-CYLINDER 4-STROKE 7,2 / 6, WHICH WORK ON THE SYNTHESIS-GAS

B.G. Timoshevsky, M.R. Tkach, A.S. Mitrofanov, A.S. Poznansky, A.U. Proskurin

The results of experimental studies of the spark-ignition engines with external mixture formation at work on the synthesis gas produced by steam reforming of ethanol are presents. The depending change of engine operating parameters on the load characteristics, as well as the indicator diagrams on petrol, propane gas and synthesis gas are obtained. The effect of excess air ratio on the change in pressure in the cylinder when the engine working of the synthesis gas is shows.

УДК 621.43

А.М. Левтеров, Л.И. Левтерова, Н.Ю. Гладкова

РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК АВТОМОБИЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ, РАБОТАЮЩЕГО НА БЕНЗОЭТАНОЛЕ

Потенциал производства и использования этилового спирта в качестве моторного топлива в Украине достаточно велик, в связи с чем прогнозирование эффективности, показателей токсичности энергоустановок транспортных средств целесообразно и востребовано. В статье приводятся результаты численного эксперимента для автомобильного двигателя МеМЗ 307 (4Ч7,5/7,3), работающего на бензине и бензоэтанольных смесях с различным содержанием этанола. Приводятся основные расчетные рабочие характеристики двигателя, влияние и взаимовлияние на них регулируемых и режимных параметров.

Введение и постановка задачи

Этанол (этиловый спирт) как моторное топливо в странах Южной и Северной Америки, в Европе устойчиво занял свою нишу, дополняя или заменяя определенную долю традиционных топлив. Теперь и Украина на законодательном уровне определила 5 % добавку этанола к бензину. Потенциальные возможности производства этилового спирта для пассажирского транспорта во всем мире оцениваются приблизительно в 32 % от потребляемого бензина при условии использования Е 85 [1]. Задачи необходимых исследований спиртовых топлив ставятся с возникновением новых проблем и

появлением современных технических возможностей. Научный материал по этой тематике обширен, касается экспериментальных [2, 3], численных и расчетно-экспериментальных работ [4, 5, 6], причем часто в работах одновременно рассматривается использование этанола в двигателях с искровым зажиганием (ИЗ) и дизелях [3, 7, 8]. В [2] представлены обобщенные результаты экспериментальных исследований разных авторов для различных типов двигателей и условий. Моделированию рабочего процесса двигателя и получению его рабочих характеристик посвящены работы [4 – 7]. Следует отметить, что за редким исключением, исследова-

ния проводятся для смесевых топлив с содержанием спирта до 20 – 30 %. В развитых странах, которые уже прошли путь первоначальных исследований, проводятся более глубокие изыскания с многоплановым рассмотрением химических превращений испарившегося топлива и отработавших газов [9].

Смесевое моторное топливо на основе традиционного нефтяного и ингредиентов биологического происхождения по сути является новым видом топлива, что в случае его использования неизбежно сказывается на мощностных, экономических и токсических характеристиках двигателя. Поэтому и качественные, и количественные результаты исследований влияния бензоэтанола различного состава на характеристики рабочего цикла двигателя важны для обеспечения эффективности его использования в транспортных ДВС. В предлагаемой статье приводятся результаты численного исследования рабочего цикла двигателя с ИЗ для широкого спектра комбинаций компонентов смесевое топлива.

Результаты численного эксперимента

Всестороннее понимание качественного взаимовлияния параметров двигателя при использовании новых топлив может без больших затрат на моторные испытания дать математическое моделирование его рабочего процесса. При прогнозировании экономических и токсических характеристик двигателя с искровым зажиганием широко используются и хорошо себя зарекомендовали термодинамические модели рабочего цикла с традиционной 2–зонной моделью сгорания.

В статье приводятся результаты численного исследования рабочих характеристик двигателя МеМЗ 307 (4Ч7,5/7,3), технические характеристики которого приведены в таблице 1.

Таблица 1. Технические характеристики двигателя 4Ч7,5/7,3

Параметр	Значение
Диаметр цилиндра, м	0,073
Ход поршня, м	0,075
Отношение радиуса кривошипа к длине шатуна	0,3125
Число цилиндров	4
Степень сжатия	9,8
Рабочий объем, см ³	1300
Номинальная мощность, кВт/ при частоте вращения коленчатого вала, мин ⁻¹	47/5000
Топливо - бензоэтанольные смеси, % объемные	

Каждое моторное топливо имеет набор свойств, определяющих показатели рабочего цикла двигателя, большая часть этих свойств оказывает решающее влияние на процесс сгорания в цилиндре. Наличие этанола в смесевом топливе способствует увеличению скорости распространения пламени, улучшает однородность сгорания вследствие содержания кислорода в спирте (C_2H_5OH), повышает октановое число, что позволяет увеличить степень сжатия без угрозы возникновения детонации. Однако удельная теплота сгорания смесевое топлива с ростом содержания этанола в нем снижается и это отражается на показателях двигателя. По ходу исследований проверено утверждение некоторых исследователей, что увеличение содержания этанола в смеси вызывает рост литровой мощности двигателя из-за увеличения плотности смесевое топлива. Действительно, при полном замещении бензина этанолом плотность топливо-воздушной смеси увеличивается на 0,4 %, а литровая мощность двигателя вырастает на 5-6 %, но происходит ли это только за счет увеличения плотности, вопрос спорный.

Численные исследования прогнозируемых характеристик двигателя проводились в соответствии с методикой [10]. В расчетах рабочего цикла двигателя рассматривались топливные композиции с концентрацией этанола 0; 0,1; 0,3; 0,6; 0,85 в смеси (G_{n_2}/G_{n_2}). Ниже приводятся результаты расчетов, демонстрирующие влияние режимных и регулировочных параметров двигателя, состава смесевое топлива на показатели рабочего цикла.

На рис. 1 для режимов номинальной мощности и максимального крутящего момента приведены основные характеристики двигателя (p_i , η_i , p_{max} , T_{max}) в зависимости от состава смеси. Для всех параметров наблюдается их незначительный рост по мере увеличения содержания этанола до 85 % и заметный рост при концентрации этанола от 60 до 100 % при почти неизменном значении КПД для каждой топливной композиции и сохранении характера кривых. На рис. 2 представлены значения индикаторных мощности, крутящего момента и удельного расхода топлива по скоростной характеристике в зависимости от состава композиции. Отмечается незначительный (до 5 %) рост мощностных показателей с увеличением содержания этанола в смеси. Рисунок иллюстрирует влияние состава топлива на величину его удельного расхода; вот где сказывается влияние низшей теплоты сгорания этанола на калорийность смесевое топлива.

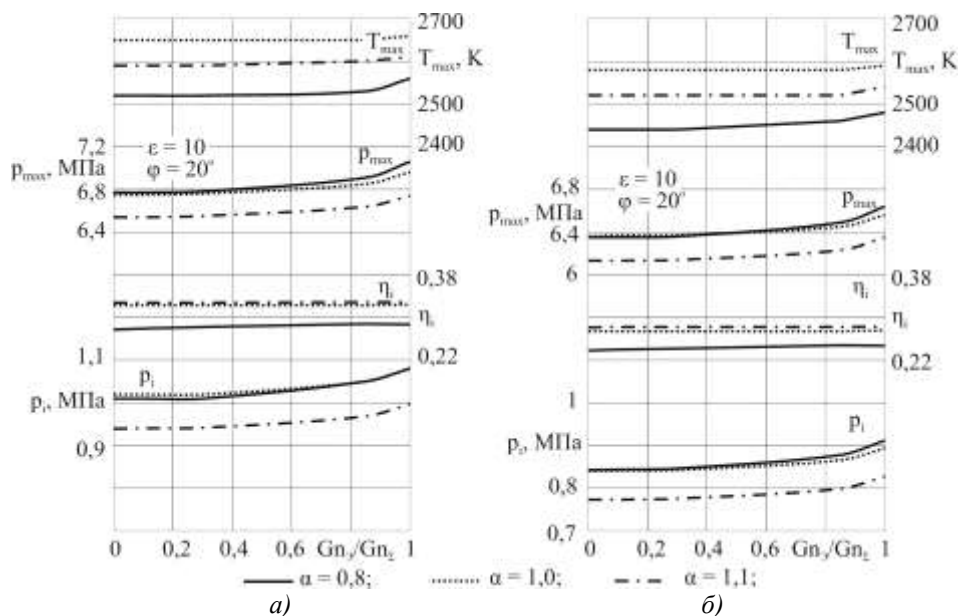


Рис. 1. Индикаторные показатели двигателя на режимах $N_{\text{ном}}$ и M_{max} в зависимости от состава бензоэтанола и коэффициента избытка воздуха:

а – режим номинальной мощности; б – режим максимального крутящего момента

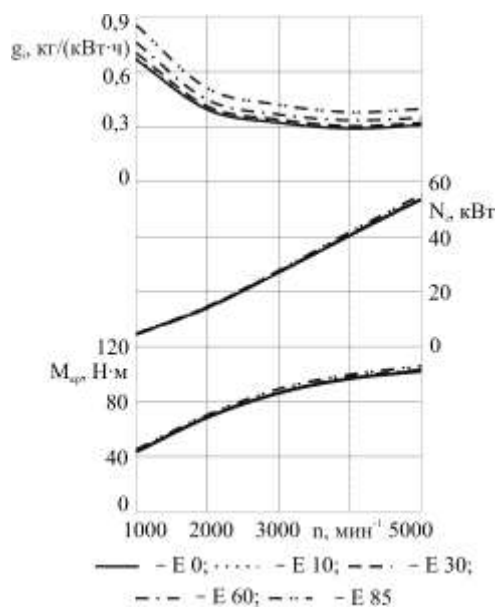


Рис. 2. Скоростные характеристики двигателя, работающего на смесевых топливах

Удельный расход смесевых топлив увеличивается с ростом содержания в нем этанола и уменьшается с увеличением частоты вращения коленчатого вала двигателя, достигая минимального значения при $n = 3600 - 4000 \text{ мин}^{-1}$. Рост мощности и крутящего момента наблюдается на фоне увеличения удельного расхода топлива, что и объясняет практически неизменность КПД для каждой композиции. На абсолютную величину КПД влияет значение коэффициента избытка воздуха.

Прогнозирование показателей токсичности отработавших газов (содержание монооксидов азота NO , угарного газа CO) и углекислого газа CO_2 рассматривалось как во взаимовлиянии регулировочных, режимных и конструктивных параметров (α , ϕ , ϵ), так и в зависимости от состава смеси (G_{n1}/G_{n2}) и режима работы двигателя. Значение величины эмиссии представлено в граммах за цикл двигателя.

При коэффициенте избытка воздуха (α) меньше единицы возрастает концентрация угарного газа. Обеднение смеси вызывает сначала рост концентрации монооксидов азота, а затем, из-за понижения максимальной температуры сгорания в цилиндре двигателя при $\alpha > 1,1$, – ее снижение (это хорошо видно на рисунках 3 и 4), что характерно для любого топлива. Изменение угла опережения зажигания (ϕ) с точки зрения экономичности целесообразно только в небольшом диапазоне. Увеличение угла опережения зажигания при $\alpha > 1$, вызывает значительный рост эмиссии NO .

Увеличение концентрации этанола в топливной композиции сопровождается изменением эмиссии оксидов азота в зависимости от частоты вращения коленчатого вала двигателя и коэффициента избытка воздуха. Содержание CO и CO_2 в отработавших газах уменьшается с увеличением концентрации этанола. Эмиссия этих компонентов с отработавшими газами также зависит от частоты вращения коленчатого вала, α и мощностного режима двигателя (рис. 5).

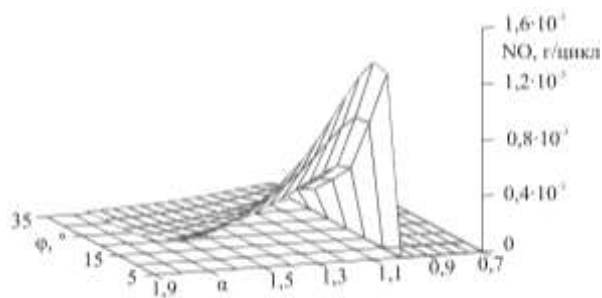


Рис. 3. Зависимость эмиссии монооксида азота от коэффициента избытка воздуха и угла опережения зажигания при использовании топлива Е 30

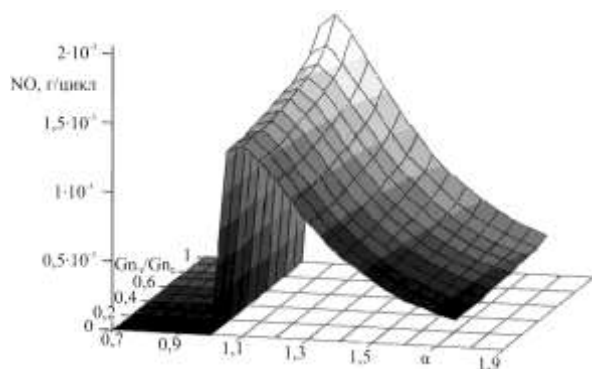


Рис. 4. Уровень эмиссии NO в зависимости от доли этанола в смесевом топливе и коэффициента избытка воздуха

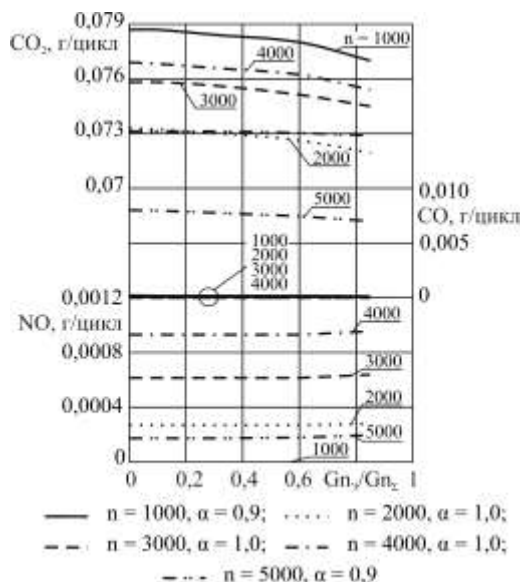


Рис. 5. Содержание в отработавших газах монооксидов азота и оксидов углерода в зависимости от частоты вращения коленчатого вала, состава топливной композиции и α , (полная нагрузка)

Наряду с расчетными исследованиями в ИПМаш НАН Украины проведена серия экспери-

ментальных исследований характеристик двигателя МеМЗ 307. Была отмечена хорошая корреляция прогнозируемых и полученных в эксперименте результатов [11].

Эксперименты показали, что на определенном этапе увеличения концентрации этанола в топливной смеси существенно снижаются эффективные показатели двигателя без изменения программы блока управления. Поэтому для сохранения эксплуатационных характеристик двигателя необходима адаптация системы его управления.

Выводы

Анализ результатов численного моделирования характеристик двигателя МеМЗ 307, работающего на бензоэтанольных смесях, позволяет сделать вывод, что во всем диапазоне рассматриваемых топливных композиций (0, 10, 30, 60 и 85 процентов этанола) могут быть достигнуты удовлетворительные значения его экономических и экологических показателей. Мощность и максимальный крутящий момент не уменьшаются, несмотря на более низкую удельную теплоту сгорания смесового топлива, но увеличивается его удельный расход. Эмиссия монооксида азота при поддержании коэффициента избытка воздуха в диапазоне 0,9 – 1,0 немного возрастает только после достижения концентрации этанола в смесевом топливе 60 %. Моторный эксперимент показал, что двигатель устойчиво работает на обедненной топливно-воздушной смеси ($1,0 \leq \alpha \leq 1,5$), а эмиссия оксидов азота с отработавшими газами возрастает по мере увеличения доли этанола в смесевом топливе.

При переводе транспортного двигателя на питание бензоэтанолом достижение мощностных и экологических показателей, соответствующих техническим характеристикам бензинового двигателя, возможно за счет увеличения цикловой подачи смесового топлива. Для этого необходимы дополнительные исследования, связанные с изменением алгоритма управления двигателем.

Список литературы:

1. Kim S. Global potential bioethanol production from wasted crops and crop residues /S. Kim, B.E. Dale// Biomass and Bioenergy. – 2004.– V. 26.– P. 361–375.
2. Alternative fuel / Edited by Maximino Manzanera. – Croatia, 2011. – 396 с.
3. Ерохов В.И. Одинокова И.В. Применение спиртов в бензиновых двигателях и дизелях / В.И.Ерохов, И.В.Одинокова // Автомобиле- и тракторостроение в России: приоритеты развития и подготовка кадров: материалы Международной науч.-техн. конф., посвященной 145-летию МГТУ "МАМИ". – М., 2010. – С. 106 – 115.
4. Srinivasan C. Study of Combustion Characteristics of an SI Engine Fuelled with Ethanol and Oxygenated Fuel Additives / C. Srinivasan and C. Saravanan // Journal of Sustainable Energy. – 2010. – P. 85 – 91
5. Кухаренко Г.М.

Моделирование рабочего процесса двигателя при работе на смесях бензина с этанолом / Г.М.Кухаренко, Г.А.Вершина, А.Ю.Пилатов // Вісник Автомобільно-дорожного інституту. – 2012. – № 1(14). – С. 34 – 44. 6. Bayraktar, H. Experimental and theoretical investigation of using gasoline – ethanol blends in spark-ignition engines. Renewable Energy. – 2005. – V. 30. – P. 1733 – 1747. 7. Матиевский Д. Д. Применение смесевых спиртовых топлив в дизелях автотракторного типа / Д. Д. Матиевский, С. П. Кулманаков // Вестник Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова. – Барнаул, 2000. – № 2. – С. 87 – 93. 8. Патрахальцев Н.Н. Регулирование ДВС методом изменения физико-химических свойств моторного топлива / Н.Н. Патрахальцев // Транспорт на альтернативном топливе. – 2010. – № 3. – С. 26 – 32. 9. Ginnebaugh L. Examining the temperature dependence of ethanol (E85) versus gasoline emissions on air pollution with a largely-explicit chemical mechanism / L. Ginnebaugh, J. Liang, Z. Jacobson // Atmospheric Environment. – 2010. – V. 44(9) P. 1192 – 1199. 10. Левтеров А.М. Метод исследования характеристик поршневых ДВС на альтернативных топливах / А.М. Левтеров, Л.И. Левтерова, Н.Ю. Гладкова // Вісник НТУ «ХПІ»: «Математичне моделювання в техніці та технологіях». – 2011. – Вип. 42. – С. 99-106. 11. Левтеров А.М. Расчетно-экспериментальные исследования характеристик двигателя MeMz 307-1 на бензоэтанольных смесях / А.М. Левтеров, Л.И. Левтерова, Н.Ю. Гладкова, В.П. Мараховский, А.Н. Авраменко // Вісник НТУ «ХПІ»: «Математичне моделювання в техніці та технологіях». – 2012. – Вип. 27. – С. 107 – 113.

Bibliography (transliterated):

1. Kim S. Global potential bioethanol production from wasted crops and crop residues / S. Kim, B.E. Dale // Biomass and Bioenergy. –

2004. – V. 26. – P. 361 – 375. 2. Alternative fuel / Edited by Maximino Manzanera. – Croatia, 2011. – 396 s. 3. Erohov V.I. Odinkova I.V. Primenenie spir-tov v benzinovyh dvigatel'nyh i dizel'nyh / V.I.Erohov, I.V.Odinokova // Avtomobile- i traktorostroenie v rossii: priority razvitiya i podgotovka kadrov: materialy Mezhdunarodnoj nauchn.-tehn. konf., posvya-shhennoj 145-letiju MGTU "MAMI". – M., 2010. – S. 106 – 115. 4. Srinivasan C. Study of Combustion Characteristics of an SI Engine Fuelled with Ethanol and Oxygenated Fuel Additives / C. Srinivasan and C. Saravanan // Journal of Sustainable Energy. – 2010. – P. 85 – 91. 5. Kuharenok G.M. Modelirovanie rabocheho processa dvigatelja pri rabote na smesjah benzina s jetanolom / G.M.Kuharenok, G.A.Vershina, A.Ju.Pilatov // Visti Avtomobil'no-dorozhn'ogo institutu. – 2012. – № 1(14). – S. 34 – 44. 6. Bayraktar, H. Experimental and theoretical investigation of using gasoline – ethanol blends in spark-ignition engines. Renewable Energy. – 2005. – V. 30. – P. 1733 – 1747. 7. Ma-tievskij D. D. Primenenie smesevykh spirtovykh topliv v dizel'nyh avtotraktornogo tipa / D. D. Matievskij, S. P. Kulmanakov // Vestnik Altajskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta im. I.I. Polzunova. – Barnaul, 2000. – № 2. – S. 87-93. 8. Patrah'al'cev N.N. Regulirovanie DVS metodom izmenenija fiziko-himicheskih svojstv motornogo topliva / N.N. Patrah'al'cev //Transport na al'ternativnom toplive. – 2010. – № 3. – S. 26 – 32. 9. Ginnebaugh L. Examining the temperature dependence of ethanol (E85) versus gasoline emissions on air pollution with a largely-explicit chemical mechanism / L. Ginnebaugh, J. Liang, Z. Jacobson // Atmos-pheric Environment. – 2010. – V. 44(9) P. 1192 – 1199. 10. Levterov A.M. Metod issledovanija harakteristik porshnevnyh DVS na al'ternativnyh toplivah / A.M. Levterov, L.I. Levterova, N.Ju. Gladkova // Visnik NTU «HPI»: «Matematichne modeljuvannja v tehniči ta teh-nologijah». – 2011. – Vyp. 42. – S. 99 – 106. 11. Levte-rov A.M. Raschetno-jeksperimental'nye issledovanija harakteristik dvigatelja MeMz 307-1 na benzojetanol'-nyh smesjah / A.M. Levterov, L.I. Levterova, N.Ju. Glad-kova, V.P. Marahovskij, A.N. Avramenko // Visnik NTU «HPI»: «Matematichne modeljuvannja v tehniči ta teh-nologijah». – 2012. – Vyp. 27. – S. 107 – 113.

Поступила в редакцию.22.05.2013

Левтеров Антон Михайлович – канд. техн. наук, ст. науч. сотр., отдела поршневых энергоустановок Института проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины, Харьков, Украина, e-mail: dppp@ipmach.kharkov.ua

Левтерова Людмила Ивановна – ведущий инж. отдела поршневых энергоустановок Института проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины, Харьков, Украина, e-mail: dppp@ipmach.kharkov.ua.

Гладкова Наталья Юрьевна – ведущий инж. отдела поршневых энергоустановок Института проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины, Харьков, Украина, e-mail: dppp@ipmach.kharkov.ua.

РЕЗУЛЬТАТИ ЧИСЕЛЬНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК АВТОМОБІЛЬНОГО ДВИГУНА, ЩО ПРАЦЮЄ НА БЕНЗОЕТАНОЛІ

А.М. Левтеров, Л.І. Левтерова, Н.Ю. Гладкова

Потенціал виробництва та використання етилового спирту у якості моторного палива в Україні достатньо великий, внаслідок чого прогнозування показників ефективності та токсичності енергоустановок транспортних засобів є доцільним та таким, що має попит. В статті викладено деякі результати чисельного моделювання характеристик автомобільного двигуна MeMz 307 (4Ч 7,5/7,3), що працює на бензині та бензоетанольних сумішах з різним вмістом етанолу. Наводяться основні розрахункові характеристики двигуна, вплив та взаємовплив на них регульованих та режимних параметрів.

RESULTS OF NUMERICAL PROBE OF CHARACTERISTICS OF THE AUTOMOBILE ENGINE WORK ON PETROLETHANOL

A.M. Levterov, L.I. Levterova, N.Y. Gladkova

The potential of manufacture and use of ethyl spirit as motor fuel in Ukraine are great enough, in this connection forecasting of efficiency, indicators of toxicity of powerinstallations of vehicles are expedient and demanded. In article results of numerical experiment of the automobile engine of Memz 407 (4ч 7.5/7.3), work on gasoline and the benzoetanolnykh mixtures with the various maintenance of ethanol was resulted. The basic settlement performance data of the engine, influence and interference on them adjustable and regime parametres was also resulted.

ПОВЫШЕНИЕ ТОПЛИВНО-ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ДВУХТАКТНОГО ДВС С ИСКРОВЫМ ЗАЖИГАНИЕМ ЗА СЧЕТ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ВНУТРЕННЕГО СМЕСЕОБРАЗОВАНИЯ

Представлена оценка эффективных и экологических показателей двухтактного двигателя с карбюраторной системой питания и системой непосредственного впрыскивания топлива. Экспериментальные данные получены при рациональных регулировочных характеристиках топливной аппаратуры (давление впрыска топлива, начало подачи топлива) и близких к оптимальным значениям моменты подачи искры зажигания.

Введение и постановка проблемы

В настоящее время обоснованно повышены требования к двигателям внутреннего сгорания по снижению выбросов вредных веществ (ВВ) с отработавшими газами (ОГ), т.к. количество ДВС неуклонно растет, что предопределяет увеличение массы токсичных выбросов в атмосферу и загрязнение окружающей среды. Также наряду с ограничением ВВ с ОГ безусловно целесообразно с экономической точки зрения и ввиду сокращения природных углеводородных запасов снижение потребления топлива ДВС. Поэтому исследования по совершенствованию организации рабочих процессов в ДВС, способствующие повышению их топливно-экологических показателей, являются актуальными.

Применение непосредственного впрыска топлива (НВТ), особенно в двухтактных ДВС с искровым зажиганием (ИЗ), позволяет снизить расход топлива и сократить выбросы ВВ с ОГ. Однако, с одной стороны организация процессов внутреннего смесеобразования в общем подходе позволяет снизить расход топлива и выбросы ВВ с ОГ, с другой стороны наилучшая экономичность априори не соответствует максимальному снижению выбросов токсичных веществ. Поэтому, одной из основных проблем организации рабочих процессов в ДВС с ИЗ при НВТ является разработка эффективного рабочего процесса, который бы позволил максимально снизить расход топлива при минимально возможных выбросах ВВ с ОГ.

Анализ публикаций. Рабочий процесс CAI (Controlled Auto Ignition) или HCCI (Homogeneous Charge Compression Ignition) в двухтактных ДВС при НВТ позволяет на установившихся режимах значительно снизить расход топлива и выбросы ВВ с ОГ. Однако сложность в создании и регулировании условий для воспламенения бензо-воздушной смеси от температуры регламентированного уровня на частичных режимах работы двигателя с изменением нагрузки препятствует массовому производству двигателей с этими рабочими процессами [1].

Применение фирмой Orbital Engine Co. непосредственного пневматического впрыскивания заранее подготовленной топливно-воздушной смеси в цилиндр ДВС с ИЗ позволяет организовать глубокое расслоение топливно-воздушного заряда (ТВЗ) с качественным, практически однородным составом смеси. Двигатель имеет низкий расход топлива и ограниченные выбросы ВВ в ОГ за счет наличия избытка воздуха в ТВЗ (коэффициент избытка воздуха $\alpha > 2$) на частичных нагрузках. При своих достоинствах организации внутреннего смесеобразования и расслоенного сгорания эффективные показатели двигателя снижены в связи с затратами мощности на привод воздушного компрессора [2].

Фирмы VW, BMW, Audi, Mercedes-Benz для организации сгорания расслоенного топливно-воздушного заряда (РТВЗ) на частичных нагрузках в головку цилиндра двухтактного двигателя установила гидравлическую насос-форсунку, которая впрыскивает топливо непосредственно в зону электродов свечи зажигания. Уровень экономических и экологических показателей двигателя ограничен из-за неравномерного распределения частиц топлива по объему топливно-воздушной смеси при сгорании [3, 4].

Организация внутреннего пленочного смесеобразования в двухтактном ДВС с ИЗ при НВТ позволила создать РТВЗ на частичных нагрузках с практически однородным обогащенным составом топливно-воздушной смеси ($\alpha=0,8\div0,9$) при $\alpha_s=2$, что обеспечило интенсивное сгорание РТВЗ [5]. При такой организации РТВЗ топливно-экологические показатели двигателя ограничены обогащенным составом топливно-воздушной смеси.

Цель и задачи исследований. Целью настоящих исследований является определение факторов, позволяющих повысить топливно-экологические показатели двухтактного ДВС с ИЗ при использовании НВТ и организации пленочного смесеобразования с последующим сгоранием обедненного РТВЗ.

Для достижения поставленной цели решались задачи организации эффективного сгорания обедненного расслоенного ТВЗ, а также определения топливно-экологических показателей двухтактного ДВС с ИЗ при карбюраторной системе питания (внешнее смесеобразование) и при двух способах пленочного (внутреннего) смесеобразования с РТВЗ при НВТ и, соответственно, с обогащенным и обедненным составом топливно-воздушной смеси.

Анализ результатов экспериментальных исследований. Топливо-экологические показатели получены путем экспериментального исследования одноцилиндрового двухтактного двигателя ДН-4 ($S/D=87/82$) с ИЗ, кривошипно-камерной продувкой и воздушным охлаждением. Исследования проводились на кафедре ДВС НТУ «ХПИ». Для сравнения на (рис. 1-3) представлены эффективные и экологические показатели двигателя с карбюраторной системой питания и системой НВТ при работе на режимах нагрузочной характеристики при $n=3000 \text{ мин}^{-1}$ и использовании бензина А-80.

С карбюраторной системой питания на двигатель устанавливалась базовая головка цилиндра с полуразделенной симметричной камерой сгорания (КС) ($\varepsilon_{\text{геом}}=8,4$), а с системой НВТ – модернизированная головка цилиндра с полуразделенной КС, смещенной к выпускному окну ($\varepsilon_{\text{геом}}=12$) [6].

При работе двигателя с системой НВТ устанавливались рациональные регулировочные харак-

теристики топливной аппаратуры (давление впрыска топлива ($P_{\text{впр}}=1,8 \text{ МПа}$), начало момента подачи топлива) и близкие к оптимальным значениям углы опережения зажигания в зависимости от нагрузки, определенные с учетом возможности достижения минимальных значений удельного эффективного расхода топлива (g_e).

Особенность организации РТВЗ при НВТ заключается в обеспечении обогащенного состава топливно-воздушной смеси между электродами свечи зажигания [7].

В диапазоне нагрузок от $P_e = 0,149 \text{ МПа}$ до $P_e = 0,293 \text{ МПа}$ момент начала подачи топлива $\varphi_{\text{впр}} = 224$ град. п.к.в. после ВМТ, с повышением нагрузки до $P_e = 0,471 \text{ МПа}$ начало подачи топлива смещалось ближе к НМТ ($\varphi_{\text{впр}} = 205$ град. п.к.в. после ВМТ). При этом в диапазоне нагрузок от $P_e=0,149 \text{ МПа}$ до $P_e=0,225 \text{ МПа}$ угол опережения зажигания $\theta_{\text{зак}} = 8$ град. п.к.в. до ВМТ, с повышением нагрузки до $P_e = 0,293 \text{ МПа}$ $\theta_{\text{зак}} = 10$ град. п.к.в. до ВМТ и при максимальных нагрузках $\theta_{\text{зак}} = 27$ град. п.к.в. до ВМТ.

При организации данного способа РТВЗ с системой НВТ позволило, по сравнению с карбюраторной системой питания, при минимальных нагрузках снизить g_e в среднем в 2 раза, а с повышением нагрузки до максимальных значений – в 1,7 раза (рис. 1).

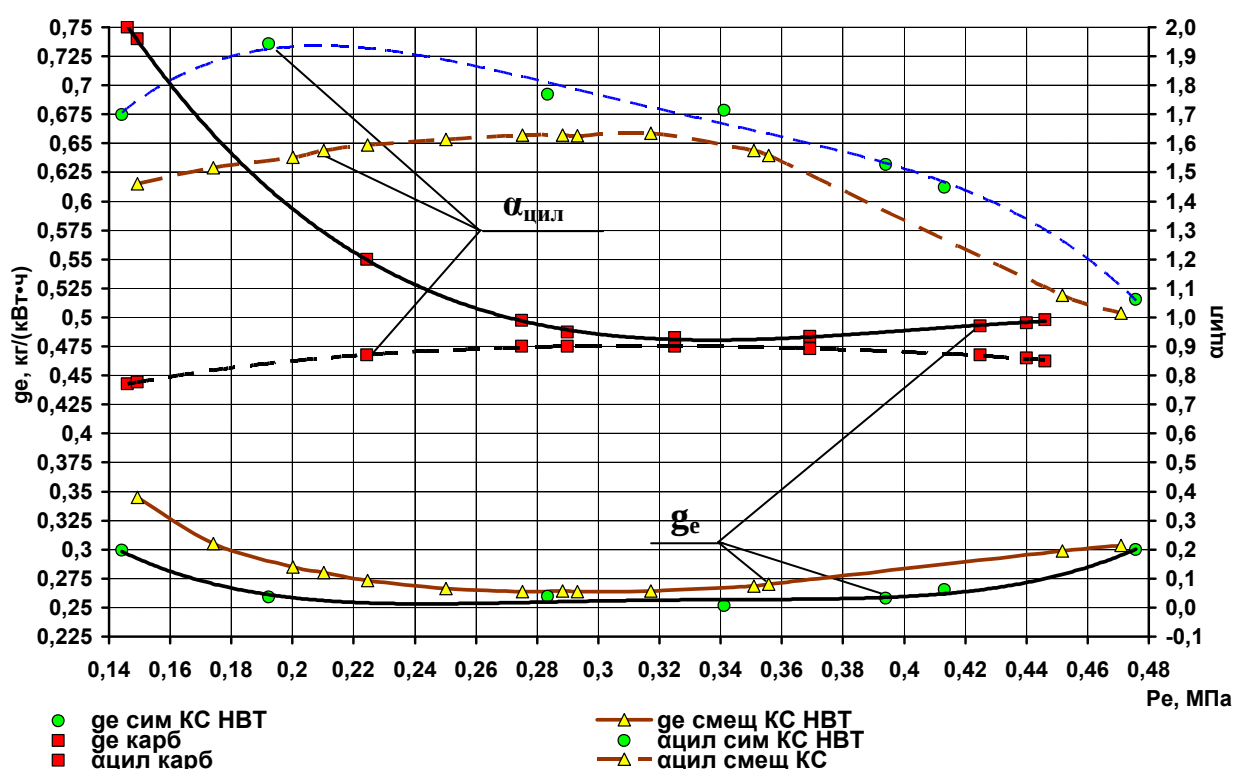
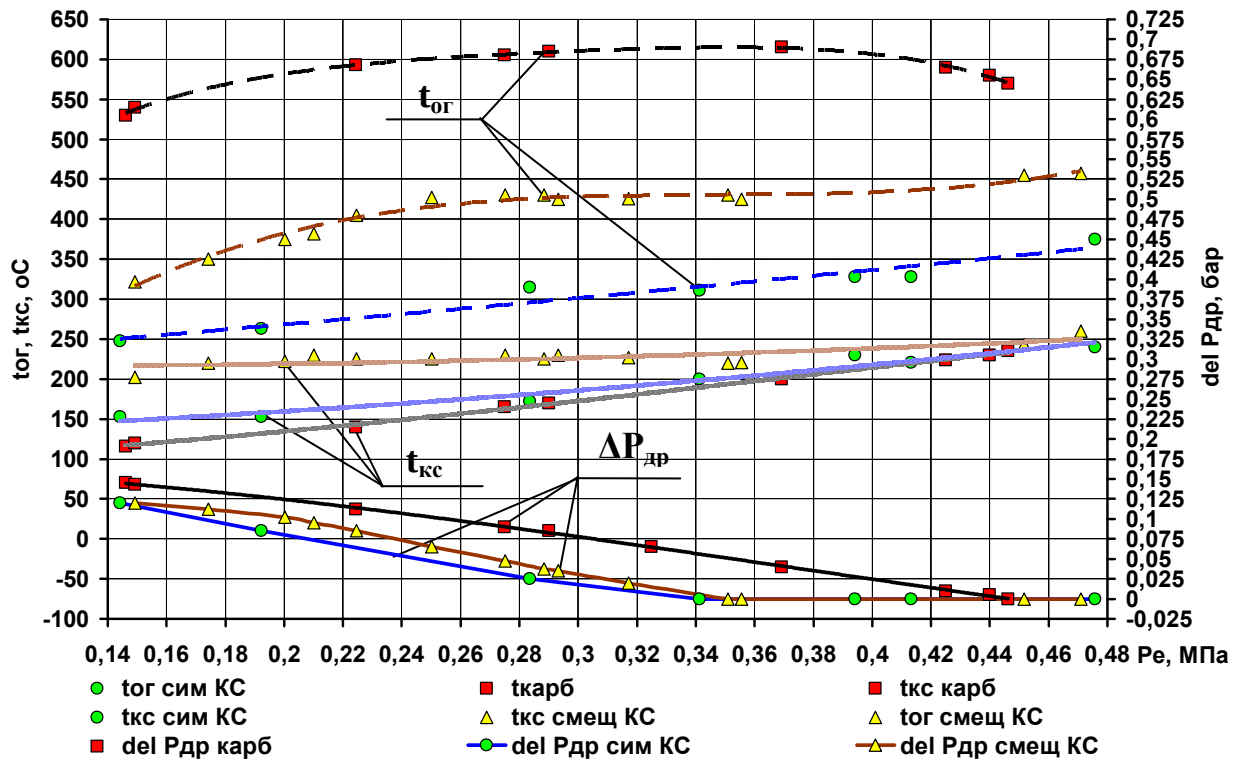
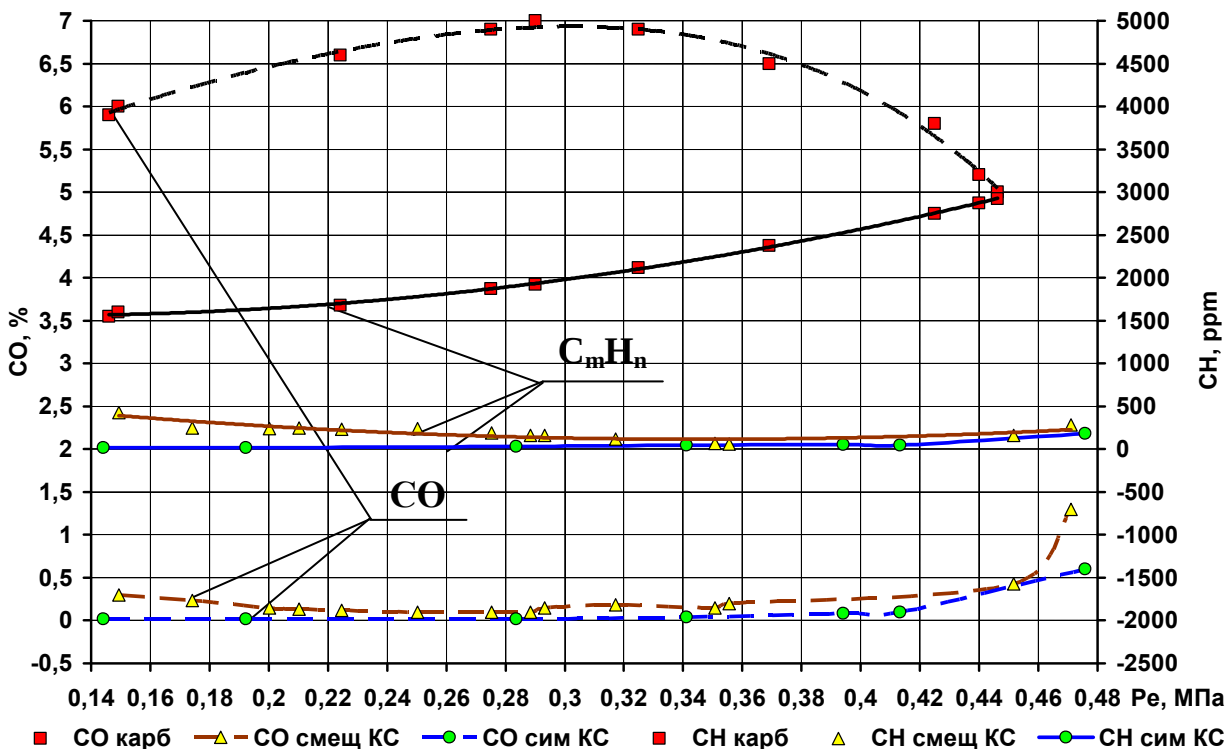


Рис. 1. Значения g_e и $\alpha_{\text{цил}}$ двигателя с карбюраторной системой питания, и при НВТ с обогащенным и обедненным РТВЗ

Рис. 2. Значения температур $t_{ог}$, $t_{кк}$ и разрежения на впуске $\Delta P_{др}$ при изменении нагрузкиРис. 3. Содержание CO и C_mH_n в ОГ при изменении нагрузки

Повышение средних значений коэффициента избытка воздуха в цилиндре (до $\alpha_{цил.ср}=1,63$) при минимальных значениях g_e по сравнению с карбюраторной системой питания, где $\alpha=0,9$ способствовало также сокращению выбросов ВВ с ОГ. При

этом, содержание CO в ОГ снижено с 7 % до 0,1 %, а C_mH_n в среднем с 2000 ppm до 200 ppm ($P_e=0,29$ МПа) (рис. 3). Снижение g_e двухтактного двигателя при НВТ по отношению к карбюраторной системе питания согласуется со снижением температуры

ОГ в среднем с 600 °С до 420 °С ($P_e=0,22\div0,4$ МПа) и повышением температуры поверхности КС в среднем до $t_{кс}=220$ °С, тогда как у карбюраторного ДВС в этом интервале нагрузок $t_{кс}=120\div210$ °С.

Потенциальные возможности повышения топливно-экологических показателей двухтактного двигателя с РТВЗ имеются при организации сгорания более обедненной топливно-воздушной смеси. С этой целью разработан новый рабочий процесс [8], который позволил более эффективно работать двигателю с искровым зажиганием.

Топливная форсунка также расположена в стенке цилиндра, однако топливная струя с полостью внутри направлена на поверхности симметричной КС. Это позволило на такте сжатия направить с периферии к электродам свечи зажигания практически равномерно по окружности топливную смесь навстречу фронту распространения пламени. Интенсивная турбулизация ТВЗ и избыточный подвод воздуха в зону горения позволяет расширить пределы эффективного сгорания топливно-воздушной смеси обедненного состава (рис. 4).

В сравнении рабочего процесса с НВТ в смещенную к выпускному окну полуразделенную КС новый рабочий процесс с НВТ в симметричную КС позволил повысить степень сжатия до $\varepsilon_{геом}=16,3$. В результате экспериментальных исследований установлены рациональные (обеспечивающие минимум g_e) регулировочные характеристики топливной аппаратуры: $P_{впр}=3,2$ МПа и $\varphi_{впр}=224$ град. п.к.в. после ВМТ по всей нагрузочной характеристике при $n=3000$ мин⁻¹. Угол опережения зажигания от минимальных до средних нагрузок $\theta_{зж}=10$ град. п.к.в. до ВМТ и при максимальных нагрузках $\theta_{зж}=15$ град. п.к.в. до ВМТ.

При НВТ в симметричную полуразделенную КС в диапазоне минимальных нагрузок ($P_e=0,144\div0,192$ МПа) получено максимальное значение коэффициента избытка воздуха в цилиндре $\alpha_{цил}=1,94$ по отношению к НВТ в смещенную к выпускному окну полуразделенную КС, где $\alpha_{цил}=1,55$, $P_e=0,192$ МПа. При этом расход топлива снижен до 20 %. С повышением нагрузки до $P_e=0,341$ МПа $\alpha_{цил}$ снизился до 1,71, где минимальный расход топлива составил $g_e=0,252$ кг/(кВт·ч), что на 5 % меньше, чем при НВТ в смещенную к выпускному окну полуразделенную КС ($\alpha_{цил}=1,6$). В основном интервале максимальных нагрузок значения коэффициента избытка воздуха в цилиндре при обеих организациях рабочих процессов снижаются качественно одинаково, с разницей примерно 10 %, расход топлива также в среднем снижен на 10 %. Избыток воздуха при НВТ в симметричную полуразделенную КС позволяет сжечь

большее количество топлива и повысить значения максимальной нагрузки до $P_e=0,476$ МПа ($\alpha_{цил}=1,06$). Более высокие значения $\alpha_{цил}$ получены при значениях разрежения на впуске на частичных нагрузках. Повышение эффективности использования топлива при новом рабочем процессе согласуется со снижением $t_{ог}$ на 100÷150 °С и $t_{кс}$ до 30 °С на минимальных нагрузках.

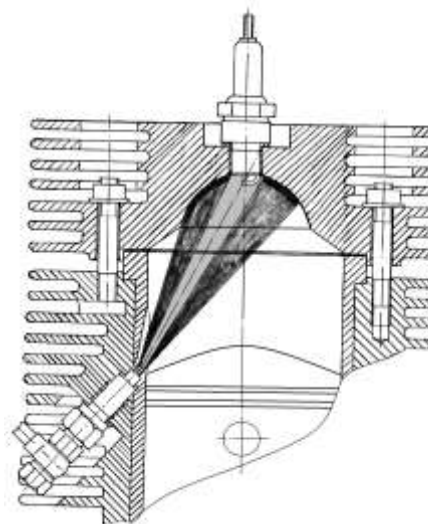


Рис. 4. НВТ в симметричную полуразделенную КС

Повышение коэффициента избытка воздуха позволило сократить содержание СО в ОГ в диапазоне нагрузок $P_e=0,144\div0,341$ МПа до 0,02÷0,04 %, т.е. в среднем в 10 раз. В области максимальных нагрузок ($P_e=0,476$ МПа) содержание СО в ОГ возрастает до 0,6 %

Улучшение условий сгорания с избытком воздуха также позволило сократить содержание C_mH_n в ОГ до 15÷20 ppm (в среднем в 100 раз) на частичных нагрузках. Максимальное содержание несгоревших углеводородов в ОГ (180 ppm) зарегистрировано на режиме максимальной мощности.

Выводы. Разработка нового рабочего процесса с РТВЗ позволила дополнительно повысить топливно-экологические показатели двухтактного двигателя ДН-4 с искровым зажиганием. Удельный эффективный расход топлива в диапазоне от минимальной до средней нагрузки ($P_e=0,144\div0,341$ МПа) снижен по сравнению с РТВЗ и обогащенным составом топливно-воздушной смеси на 20 %, в свою очередь по сравнению с карбюраторной системой питания более, чем в 2 раза. Снижение расхода топлива в диапазоне максимальных нагрузок по сравнению с РТВЗ и обогащенным составом смеси составило в среднем 10 % и по сравнению с карбюраторной системой питания в 1,7÷1,9 раза. Работа двигателя на более обедненном РТВЗ со-

кратила содержание СО в ОГ в среднем в 10 раз, а содержание C_mH_n в среднем в 100 раз. Уровень выбросов токсичных веществ позволяет выполнить современные требования без применения трехкомпонентного нейтрализатора отработавших газов.

Дальнейшие исследования по влиянию концентрации топливно-воздушной смеси в РТВЗ в новом рабочем процессе позволяют оценить как экономические, так и мощностные показатели двигателя на установившихся режимах.

Список литературы:

1. Zhao H. HCCI and CAI Engines for the Automotive Industry / Edited by Zhao Hua. – Cambridge: CRC Press, 2007. – 557 p. 2. Илей Л.В. Новый двухтактный двигатель «Orbital» / Л.В. Илей // Автомобильная промышленность США. – 1986. – №7. – С. 5-8. 3. Zhao H. Advanced Direct Combustion Engine Technologies and Development. Volume 1: Gasoline and gas engines / Edited by Zhao Hua. – Oxford: CRC Press, 2010. – 325 p. 4. Merker G. Combustion Engines Development / G. Merker, C. Schwarz, R. Teichmann. – Berlin: Springer, 2009. – 699 p. 5. Корогодский В.А. Организация пленочного смесеобразования и определение степени расслоения заряда в двигателе с искровым зажиганием и непосредственным впрыскиванием топлива / В.А. Корогодский, С.В. Обозный // Двигатели внутреннего сгорания. – 2003. – №1-2. – С. 41-48. 6. Корогодский В.А. Организация рационального способа регулирования мощности в двигателе с искровым зажиганием // Двигатели внутреннего сгорания. – 2013. – №1. – С. 11-16. 7. Пат. 60614А України, МКІ F02B 17/00. Двигун внутрішнього згорання / В.А. Корогодський, С.В. Обозний (UA). –

№2003010308; Заявл. 14.01.2003; Опубл. 15.10.2003, Бюл. №10. – 4 с. 8. Пат. РСТ/В 2007/004105, МКІ F02B 23/10. A Method of Mixing in a Combustion Chamber of an Internal Combustion Engine and a Spark-Ignition Direct-Injection Stratified Fuel-Air Charge Internal Combustion Engine: Пат. РСТ/В 2007/004105, МКІ F02B 23/10 Korohodskiy V.A. (UA), Kyrylyuk I.O. (UA), Lomov S.G. (UA); Kulygin V.I. (UA) / № WO 2009/044225 A1; Заявл. 03.10.2007; Опубл. 09.04.2009. – 45 с.

Bibliography (transliterated):

1. Zhao H. HCCI and CAI Engines for the Automotive Industry / Edited by Zhao Hua. – Cambridge: CRC Press, 2007. – 557 p. 2. Iley L.V. Novyy dvuhaktynyj dvigatel' «Orbital» / L.V. Iley // Avtomobil'naja promyshlennost' SShA. – 1986. – №7. – S. 5-8. 3. Zhao H. Advanced Direct Combustion Engine Technologies and Development. Volume 1: Gasoline and gas engines / Edited by Zhao Hua. – Oxford: CRC Press, 2010. – 325 p. 4. Merker G. Combustion Engines Development / G. Merker, C. Schwarz, R. Teichmann. – Berlin: Springer, 2009. – 699 p. 5. Korogodskiy V.A. Organizacija plenchnogo smeseobrazovaniya i opredelenie stepeni rassloeniya zarjada v dvigatele s iskrovym zazhiganiem i neposredstvennym vpryskivaniem topliva / V.A. Korogodskiy, S.V. Oboznnyj // Dvigateli vnutrennego sgoraniya. – 2003. – №1-2. – S. 41-48. 6. Korogodskiy V.A. Organizacija racional'nogo sposoba regulirovaniya moshhnosti v dvigatele s iskrovym zazhiganiem // Dvigateli vnutrennego sgoraniya. – 2013. – №1. – S. 3-8. 7. Pat. 60614A Ukraini, MKI F02B 17/00. Dvigun vnutrishn'ogo zgorjannja / V.A. Korogodskij, S.V. Oboznnyj (UA). – №2003010308; Zayavl. 14.01.2003; Opubl. 15.10.2003, Bjul. №10. – 4 s. 8. Pat. PCT/IB 2007/004105, MKI F02B 23/10. A Method of Mixing in a Combustion Chamber of an Internal Combustion Engine and a Spark-Ignition Direct-Injection Stratified Fuel-Air Charge Internal Combustion Engine: Pat. PCT/IB 2007/004105, MKI F02B 23/10 Korohodskiy V.A. (UA), Kyrylyuk I.O. (UA), Lomov S.G. (UA); Kulygin V.I. (UA) / № WO 2009/044225 A1; Zayavl. 03.10.2007; Opubl. 09.04.2009. – 45 s.

Поступила в редакцию 07.06.2013

Корогодский Владимир Анатольевич – канд. техн. наук, доцент, преподаватель кафедры теплотехники и тепловых двигателей Украинской государственной академии железнодорожного транспорта, Харьков, Украина, e-mail: korogodskiy@mail.ru

ПІДВИЩЕННЯ ПАЛИВНО-ЕКОЛОГІЧНИХ ПОКАЗНИКІВ ДВОТАКТНОГО ДВЗ З ІСКРОВИМ ЗАПАЛЮВАННЯМ ЗА РАХУНОК УДОСКОНАЛЕННЯ ПРОЦЕСІВ ВНУТРІШНЬОГО СУМІШОУТВОРЕННЯ

В.А. Корогодський

Представлена оцінка ефективних та екологічних показників двотактного двигуна з карбюраторною системою живлення й системою безпосереднього вприскування палива. Експериментальні дані отримані при раціональних регулювальних характеристиках паливної апаратури (тиск впорскування палива, початок подачі палива) і близьких до оптимальних значень моменти подання іскри запалювання.

IMPROVEMENT FUEL EFFICIENCY AND ENVIRONMENTAL PERFORMANCE OF A TWO-STROKE INTERNAL COMBUSTION ENGINE WITH SPARK-IGNITION ENGINES BY IMPROVING THE PROCESSES OF INTERNAL MIXING

V.A. Korohodskiy

The estimation of effective and environmental performance indices of two-stroke engine with a carburetor system and power supply system of direct injection fuel is offered. The experimental data obtained by adjusting the optimal characteristics of fuel system (fuel injection pressure, the start of the fuel delivery process), and close to the optimal values of the time of starting the spark plug.

В.П. Матейчик, В.П. Волков, П.Б. Комов, О.Б. Комов, І.В. Грицук

КОНТРОЛЬ РОБОТИ ТРАНСПОРТНОГО ДВИГУНА З ВИКОРИСТАННЯМ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

У статті розглядаються особливості контролю параметрів роботи транспортного двигуна, що поєднують в собі одночасно функції діагностування, моніторингу й управління. Оснащення транспортних засобів здійснюється програмно-діагностичним комплексом на основі інформаційних технологій. Представлені результати дослідження параметрів теплових процесів транспортного двигуна, які пов'язані з його пуском і прогрівом.

Вступ

Широкого поширення на автомобільному транспорті (АТ) набули мікропроцесорні системи керування (МПСК), основою яких є високопродуктивні мікроконтролери. Їх застосовують для керування двигуном, трансмісією, гальмівною системою, підвіскою. На транспортному засобі (ТЗ) одночасно може діяти кілька десятків МПСК, об'єднаних у локальну мережу за допомогою CAN-інтерфейсу. Відповідно до рекомендацій міжнародних стандартів на кожному ТЗ встановлюється діагностичний роз'єм, наприклад, OBD II або EOBD, на який виводяться контрольні параметри від кожного керуваного об'єкту. Наприклад, відповідно рекомендації ISO9141, блок керування двигуном видає на діагностичний роз'єм інформацію про 22...24 параметри, серед яких є такі: частота обертання колінчастого валу; тривалість впорскування палива; масова витрата повітря за одну годину; об'ємна витрата палива за одну годину; температура охолоджуючої рідини; швидкість руху транспортного засобу тощо. Інформація поновлюється 5 разів за секунду. Її можна зчитати за допомогою послідовного інтерфейсу.

Двигунам внутрішнього згорання притаманна особливість: показники їхньої роботи або параметри процесів, в тому числі і нормативні значення діагностичних параметрів, залежать від режиму роботи, який характеризується крутним моментом та частотою обертання колінчастого валу.

У контролері для ідентифікації режимів роботи двигуна використовується сигнал датчика положення колінчастого валу, а крутний момент визначається за сигналом датчика масової витрати повітря. Оскільки ці параметри виводяться на діагностичний роз'єм, то ними можливо скористатися для ідентифікації режимів роботи двигуна у задачі діагностування його агрегатів і систем, крім того, перелічені вище параметри є діагностичними.

Основною особливістю розвитку сучасного транспорту є інтенсивне формування інтелектуальних транспортних систем (ITS), які засновані на широкому використанні можливостей сучасних,

наприклад, космічних технологій супутникового позиціонування GPS, ГЛОНАСС тощо, засобів телематики, що в цілому формує новий для АТ науковий напрямок щодо створення систем діагностування, моніторингу й управління (ДМУ) автомобільних двигунів (АД).

Існуючі на основі ITS системи ДМУ АД складаються із двох основних складових: бортове устаткування, програмне забезпечення (ПЗ). При цьому ПЗ, у свою чергу, розподіляється на три групи (типи): клієнтське, web-інтерфейс, змішане.

В Україні створено безліч ресурсів, які використовують web-інтерфейс, що й надає клієнтам послуги моніторингу на платній, умовно безкоштовній або безкоштовній основі (наприклад, *gps-tracker.com.ua*). Це вже досить розвинені й широко відомі на АТ інформаційні сервіси. Вони дозволяють клієнтам одержувати різнопланову інформацію про об'єкт спостереження і при цьому підтримують роботу практично з усіма відомими мобільними платформами (*Android, j2me, Symbian OS, WinM*). До ресурсів підключаються різні системи датчиків ТЗ. Наприклад, повністю реалізована можливість роботи з датчиками: дискретними, наявності об'єкта тощо.

Існуючі системи ДМУ підтримують більш 100 видів бортового устаткування різних виробників, серед яких такі, «що носяться» GPS пристрої (наприклад, мобільний телефон, планшет), так і GPS професійного призначення, що представляють рішення провідних світових виробників. У результаті системи ДМУ забезпечують клієнту (за його запитом на ресурс) одержання необхідних відповідей на запити у вигляді або наочної візуальної інформації, шляхом виводу її на екран, або у вигляді звіту, наприклад, у форматі *.xls*. Це, наприклад: основні координати ТЗ; рівень і витрата палива; час, протягом якого об'єкт перебуває в русі або в стані зупинки; відомості про стан окремих агрегатів, вузлів або приладів об'єкта спостереження тощо. Існує також можливість оперативного втручання диспетчера в транспортні процеси ТЗ при виникненні різних позаштатних ситуацій, також можливість встанов-

лення голосового зв'язку з любим ТЗ і можливість одержання відео інформації.

У результаті, на сучасному АТ уже створені умови для ефективного планування й реалізації перевезень ТЗ при мінімумі витрат, а також можливість глобального діагностування й прогнозування стану й роботи як ТЗ, так і підприємств АТ у цілому. При цьому основою ефективності систем ДМУ на АТ є глибина пізнання фахівцями галузі можливостей конкретного устаткування, ПЗ для розв'язку галузевих науково-практичних завдань, що ґрунтується на комплексних системотехнічних знаннях й розумінні сучасним фахівцем не тільки парадигми *ITS*, але й, насамперед, тезауруса експлуатації транспорту [1], тобто нового для АТ словника термінів, визначень і понять.

Мета роботи

Метою роботи є формування на АТ в умовах *ITS* сучасних науково-практичних основ контролю роботи транспортного двигуна в межах системи ДМУ. Робота відноситься до досліджень, спрямованих на інтенсифікацію діяльності інженерно-технічної служби АТ, яка покликана для впровадження й забезпечення ефективної експлуатації ДМУ АД на АТ. Дослідження проведені на кафедрах «Технічна експлуатація і сервіс автомобілів» ХНАДУ й «Екологія і безпека життєдіяльності» НТУ, де ПЗ розроблено як інтелектуальний програмний комплекс (ІПК): «Ви-

ртуальний механік «HADI-12»» і «Service Fuel Eco «NTU-HADI-12»» [2, 3]. Експериментальне впровадження ІПК на АТ розкрило можливості його використання для дослідження роботи транспортного двигуна сучасних ТЗ з використанням інформаційних технологій.

Опис програмного і апаратного комплексу

При створенні експериментальних систем ДМУ використано загальнодоступне діагностичне устаткування й проведена адаптація розробленого ІПК [4] для роботи в умовах інформаційних систем АД, де існують особливості, які обумовлені, з одного боку, мобільністю ТЗ, а з іншого – його безпекою.

Існуючі ДМУ АД в умовах *ITS*, ураховують рекомендації екологічної служби, умови експлуатації ТЗ і вимагають, як показав аналіз (рис. 1) [5, 6], створення декількох інших сервісів для користувачів, де основні напрямки й конкретні проекти ПЗ визначаються категорією користувачів, умовами експлуатації й особливостями їх ТЗ, тобто для систем ДМУ АД вибір технічних сервісів повинен бути представлений, насамперед, користувачем [6, 7]. Сьогодні існує безліч апаратних комплексів діагностичного устаткування в структурах *ITS*, які зв'язані між собою воєдино, однак в основному представляють телекомунікаційні, навігаційні й інформаційні технології, пов'язані зі станом дорожнього руху (ДР) (рис. 2).

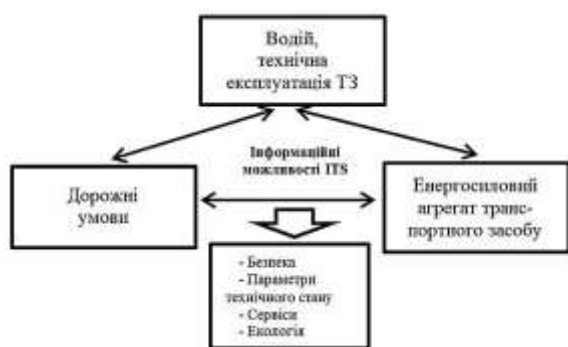


Рис. 1. Місце інфокомунікаційних технологій в системі розвитку транспорту і створенні систем ДМУ

Авторами розроблений програмно-діагностичний комплекс [2, 3], який може бути успішно інтегрований у будь-яку *ITS*, тобто він здатний вирішувати її традиційні завдання. Однак його основне призначення - контроль роботи транспортного двигуна сучасних ТЗ з використанням інформаційних технологій. Технічними засобами комплексу є: діагностичний сканер, планшет (мобіль-

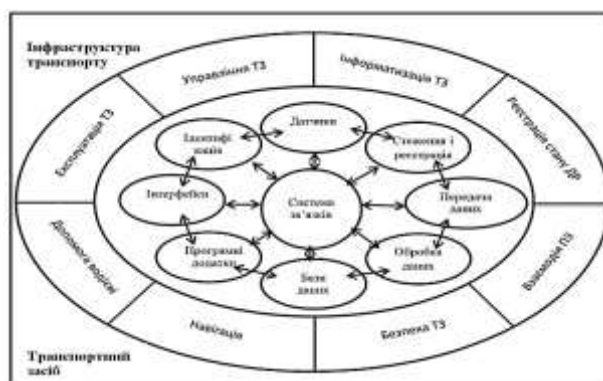


Рис. 2. Основні технологічні компоненти розробленого комплексу діагностичного обладнання в системі *ITS*

ний телефон (смартфон)) з наявністю необхідного програмного забезпечення (рис. 3).

Встановлення на ТЗ зазначеного комплексу в складі найпростіших (відповідно, недорогих) технічних засобів дозволяє, по-перше, ідентифікувати ТЗ і, по-друге, передати отриману від ТЗ інформацію в хмару *Internet* або через *Internet* безпосередньо фахівцям-діагностам. Сьогодні авторами визначений відповідний спектр специфічних завдань,

які можуть бути розподілені між технічними пристроями, і успішно вирішений ряд локальних завдань в обсязі експерименту.

Робота планшетів (мобільних телефонів), як складових процесу ДМУ, організована в структурі комплексу для виконання функцій: навігатора, відеореєстратора, таксометра або монітора діагностичного комплексу тощо. При цьому всі перераховані вище функції планшети можуть виконувати одночасно.

Для формування систем ДМУ АД використовуються діагностичні сканери, які

вимагають від ТЗ обов'язкової наявності діагностичних роз'ємів (OBD2 тощо), через які інформація від електронних блоків керування ТЗ надходить у сканер, а потім через будь-який сучасний гаджет (наприклад, мобільний телефон) в *Internet* з використанням технічних можливостей різних серверів (наприклад, ХНАДУ ТЕСА, M2M, *Orange* тощо).

У результаті АТ і, насамперед технічна експлуатація автомобілів (ТЕА), одержують можливість мати широкий спектр діагностичної інформації про технічний стан ТЗ, що перебувають у будь-якому місці світу (рис. 4).



Рис. 3. Розміщення діагностичного комплексу в салоні ТЗ: 1 - планшет – монітор діагностичного комплексу; 2 - діагностичний OBD сканер

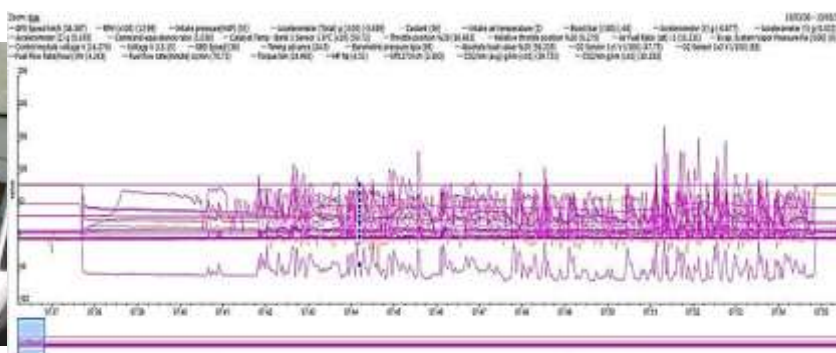


Рис. 4. Інтерфейс програми обробки й виводу в режимі онлайн інформації про результати вимірювань основних параметрів роботи АД і ТЗ

Приклади й результати експериментальних досліджень

Експериментальні дослідження полягали у використанні створеного програмно-діагностичного комплексу для дослідження параметрів теплових процесів двигуна внутрішнього згорання (ДВЗ), які

пов'язані з його пуском і прогрівом (рис.5) [8].

У цілому за допомогою програмно-діагностичного комплексу в режимі онлайн від ТЗ були отримані в реальному часі 32 діагностичні параметри, ряд з яких дозволили простежити саме процеси пуску й прогріву ДВЗ (рис. 6, 7).



Рис. 5. Інтерфейс серверної програми обробки й виводу в режимі онлайн інформації ТЗ про поточні теплові параметри АД

Аналіз результатів обробки експериментальної інформації, що була отримана від ТЗ за допомогою розробленого програмно-діагностичного комплексу, показав наявність на сучасному АТ реаль-

ної можливості використання його в структурі ITS. Здійснена можливість контролю не тільки треку ТЗ і, відповідно, розв'язання «класичних» транспортних завдань АТ, але й здійснений моніторинг діаг-

ностичних параметрів енергосилових агрегатів, що створює в ТЕА можливість переходу до прогресивних систем технічного обслуговування й ремонту (ТО й Р) за станом.

У процесі проведених досліджень виявлені проблеми сучасних сервісів, які при формуванні систем ДМУ АД обумовлені різким збільшенням

кількості параметрів, що реєструються від ТЗ у процесі моніторингу й діагностування їх АД. Ці проблеми пов'язані із тривалістю періоду контролю, тобто спостереження ТЗ і тривалістю зберігання отриманих результатів й залежать від технічних можливостей сучасних Інтернет мереж, а також від їх серверного забезпечення.

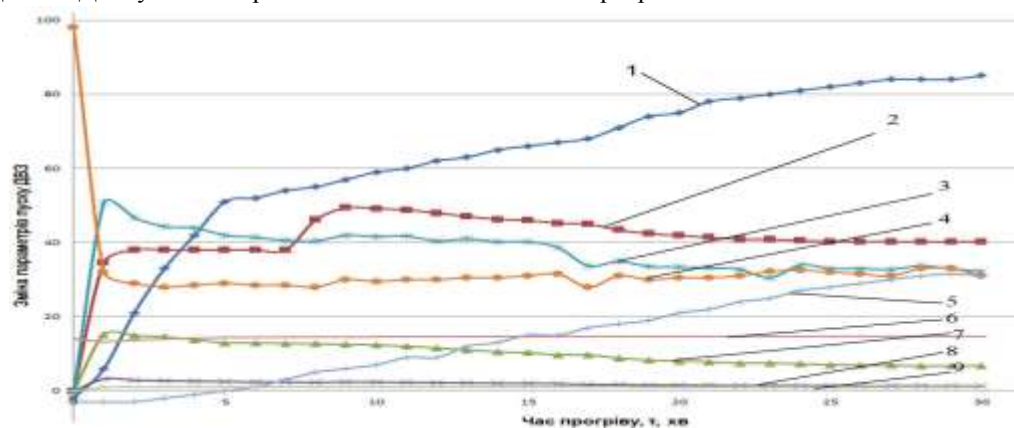


Рис. 6. Зміна основних діагностичних параметрів ДВС, що характеризують процеси його пуску і прогріву:

1 – температура охолоджуючої рідини, t , $^{\circ}\text{C}$; 2 – температура каталізатора ($\times 10$), t , K ; 3 – абсолютне значення навантаження; 4 – тиск у впускному колекторі; 5 – температура повітря на впуску, t , $^{\circ}\text{C}$; 6 – співвідношення компонентів паливо-повітряної суміші :1; 7 – частота обертання ($\times 100$), хв^{-1} ; 8 – витрата палива (л/год); 9 – коефіцієнт надлишку повітря

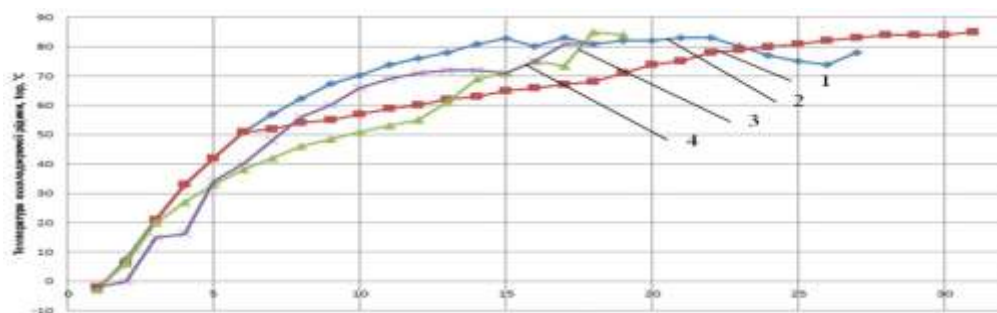


Рис. 7. Зміна параметрів температури охолоджуючої рідини ДВС при різних умовах здійснення його прогріву:

1 – прогрів тільки на х.х.; 2 – прогрів на х.х. з включенням електричних споживачів;
3 – прогрів на х.х. з поступовим прогрівом в русі; 4 – прогрів в русі

Не менш значимими проблемами є також проблеми «розуміння спектра параметрів», які діагностичні комплекси надають сучасним дослідникам. Основною причиною цих проблем є, насамперед, тезаурус, використовуваний безпосередньо виробниками комплексів. Широкий спектр імпортової техніки обумовлює в основному «сленговий» для фахівців АТ переклад назв багатьох параметрів, що викликає певні утруднення й вимагає від фахівців різних профілів їх системотехнічного співробітництва.

Висновки

Розроблено й адаптовано до сучасних умов розвитку ITS програмне й апаратне забезпечення,

що дозволяє в режимі реального часу, з підтвердженням введення даних, проводити контроль роботи транспортного двигуна сучасних ТЗ, а також планування випробувань складних технічних систем і статистичну обробку отриманих даних. Ефективність запропонованих рішень підтверджена при дослідженні теплових процесів пуску й прогріву ДВС. Визначено проблеми, обумовлені інтеграцією ITS у структуру сучасної системи ТЕА.

Список літератури:

1. Волков В.П. Ретроспективный анализ, состояние и перспективы развития технической эксплуатации автомобилей. [Текст] / В. П. Волков, В. П. Матейчик,

П. Б. Комов // Вісник Севастопольського національного технічного університету : зб. наук. пр. / Серія: Машиноприладобудування. СевНТУ. – Севастополь, 2012. Вып. №135. – С. 164–168. 2. Технічний регламент програмного продукту «Віртуальний механік «HADI-12»» при реєстрації в ньому нового транспортного засобу / Волков В. П. та інші. // Свідомство про реєстрацію авторського права на твір № 47233 от 15.01.2013. Заявка від 15.11.2012 №47525. 3. Технічний регламент програмного продукту «Service Fuel Eco «NTU-HADI-12»» при реєстрації в ньому нового транспортного засобу/ Грицук О. К. та інші. // Свідомство про реєстрацію авторського права на твір № 48063 от 26.02.2013. Заявка від 26.12.2012 №48279. 4. Информационные технологии на автомобильном транспорте [Текст] / В. М. Власов, А. Б. Николаев, А. В. Постолит, В. М. Приходько; под ред. В. М. Приходько. МАДИ (Гос. техн. ун-т). – М.: Наука, 2006. – 283 с. 5. Матейчик В. П. Методи оцінювання та способи підвищення екологічної безпеки дорожніх транспортних засобів [Текст] : монографія / В. П. Матейчик. – Київ, НТУ, 2006, с.213. 6. Кабашкин И. В. Интеллектуальные транспортные системы: интеграция глобальных технологий будущего [Электронный ресурс] / И. В. Кабашкин – Режим доступа: <http://rostransport.com/transportrf/pdf/27/34-38.pdf>. 7. Говорущенко Н. Я. Техническая эксплуатация автомобилей [Текст]. – Х.: Вища школа, 1984. – 312 с. 8. Контроль тепловых процессов в системе оперативной готовности ДВС с использованием информационных технологий позиционирования / И. В. Грицук, А. С. Добровольський, А. П. Комов, Л. А. Македонская [Текст] // Вісник Національного транспортного університету. – К.: НТУ, 2012.

– Вип. №25. – С. 80-83.

Bibliography (transliterated):

1. Volkov V.P. A retrospective analysis, the state and prospects of development of technical operation of vehicles. [Text] / V.P. Volkov, V.P. Mateychik, P.B. Komov // News Sevastopolskogo natsionalnogo tehnichnogo universitetu: sb. nauch. tr. / Seriya: Mashinopriladobuduvannya. SevNTU. - Sevastopol., 2012. № 135. - S. 164-168. 2. Tehnichny regulations software product «Virtualny Mechanical Engineer «NADI-12»» in reestratsii in nomu new transport Zasoba / Volkov VP that insh. // Svidotstvo about reestratsiyu avtorskogo rights tvir number 47233 from 15.01.2013. Application od 15.11.2012 № 47525. 3. Tehnichny regulations software product «Service Fuel Eco «NTU-HADI-12»» in reestratsii in nomu new transport Zasoba / Grischuk OK that insh. // Svidotstvo about reestratsiyu avtorskogo rights tvir number 48063 from 26.02.2013. Application od 26.12.2012 № 48279. 4. Information technologies in road transport [Text] / V.M. Vlasov, A.B. Nikolaev, A.V. Postolit, V.M. Prikhodko, ed. V.M. Prikhodko. MADI (State Technical. Univ.) - Moscow: Nauka, 2006. - 283 p. 5. Mateychik V.P. Metodi otsinyuvannya is the way to pidvischennya ekologichnoi bezpeka dorozhnikh the agriculture zasobiv [Text of] monografiya / V.P. Mateychik. - Kiev, NTU, 2006, p.213. 6. Kabashkin I.V. Intelligent transport systems: the integration of global technology of the future [electronic resource] / I.V. Kabashkin - Mode of access: <http://rostransport.com/transportrf/pdf/27/34-38.pdf>. 7. Govorushchenko N.Y. Maintenance of cars [Text]. - H.: Visha School, 1984. - 312. 8. Control of thermal processes in the system operational readiness ICE using information technology positioning / I.B. Gritsuk, A.S. Dobrowolski, A.P. Komov, L.A. Macedonian [Text] // News Natsionalnogo universitetu vehicle. - K.: NTU, 2012. - № 25. - S. 80-83.

Поступила в редакцию 12.05.2013

Матейчик Василь Петрович – доктор техн. наук, професор, завідувач кафедри «Екологія і безпека життєдіяльності» Національного транспортного університету, Київ, Україна, e-mail: matei_vp@mail.ru.

Волков Володимир Петрович – доктор техн. наук, професор, завідувач кафедри «Технічна експлуатація і сервіс автомобілів» Харківського національного автомобільно-дорожнього університету, Харків, Україна, e-mail: tesa@khadi.kharkov.ua.

Комов Петро Борисович – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри «Технічна експлуатація і сервіс автомобілів» Харківського національного автомобільно-дорожнього університету, Харків, Україна, e-mail: volga4388@yandex.ua

Комов Олександр Борисович – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри «Технічна експлуатація і сервіс автомобілів» Харківського національного автомобільно-дорожнього університету, Харків, Україна, e-mail: volga4388@yandex.ua

Грицук Ігор Валерійович – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри «Рухомий склад залізниць» Донецький інститут залізничного транспорту УкрДАЗТ, Донецьк, Україна, e-mail: gritsuk_iv@ukr.net

КОНТРОЛЬ РАБОТЫ ТРАНСПОРТНОГО ДВИГАТЕЛЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

В.П. Матейчик, В.П. Волков, П.Б. Комов, А.Б. Комов, И.В. Грицук

В статье рассматриваются особенности контроля параметров работы транспортного двигателя, объединяющие в себе одновременно функции диагностирования, мониторинга и управления. Оборудование транспортных средств осуществляется программно-диагностическим комплексом на основе информационных технологий. Представлены результаты исследования параметров тепловых процессов транспортного двигателя, связанные с его пуском и прогревом.

THE MONITORING OF WORK OF TRANSPORT ENGINE USING THE INFORMATION TECHNOLOGIES

V.P. Mateychik, V.P. Volkov, P.B. Komov, A.B. Komov, I.V. Gritsuk

The article discusses the features of monitoring the parameters of work of transport engine, combining the functions of diagnosis, monitoring and management. Vehicle equipment is carried out by program-diagnostic complex on the basis of information technologies. The results of the investigation of the parameters of thermal processes of the transport engine which are connected with its start and warming are shown.

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СТАЦИОНАРНОЙ ГТУ ЗА СЧЕТ РЕГЕНЕРАЦИИ ТЕПЛОТЫ С ВОЗМОЖНЫМ ПЕРЕПУСКОМ ГАЗОВ

Разработаны математические модели и алгоритмы системного анализа газотурбинной установки с учетом эффективности работы воздухоподогревателя и распределения в нем локальных теплогидравлических параметров. Для стационарной газотурбинной установки разработаны и проанализированы варианты конструкции трубчатого регенератора. Определен максимальный эффективный КПД установки, который можно получить с использованием регенератора выбранной конструкции.

Введение. В последнее время большое внимание ученых и практиков в области энергетики уделяется использованию высокоманевренных агрегатов, которыми являются газотурбинные установки (ГТУ). ГТУ могут быть составными частями современных энергоэффективных установок: парогазовых и газопаровых установок, когенерационных и тригенерационных агрегатов, газоперекачивающих станций. Однако эффективность (т.е. КПД) стационарных ГТУ с простой тепловой схемой на основе цикла Брайтона (без усовершенствований) невелика, и составляет при малых степенях повышения давления ($\pi_k \leq 7$) до 24%; при больших степенях повышения давления ($\pi_k = 10 \div 22$) – 28÷32%. Еще одной особенностью стационарных ГТУ является относительно низкая температура газов перед турбиной, как правило 700–900°C, из-за применения более дешевых и менее жаропрочных материалов, что обуславливает их более низкий КПД по сравнению с авиационными ГТУ. Общеизвестно, что для повышения эффективности таких установок является целесообразным применение регенерации теплоты (особенно при малых степенях повышения давления). Для ее осуществления используются теплообменные аппараты – регенераторы-воздухоподогреватели. С их применением также уменьшается тепловая нагрузка на окружающую среду, и снижаются выбросы вредных отработавших газов. Таким образом, разработка новых и усовершенствование действующих газотурбинных установок путем введения либо увеличения использования регенерации теплоты является актуальной задачей повышения энергоэффективности всей энергетической отрасли.

Постановка задачи. Тепловая эффективность воздухоподогревателей в установке определяется безразмерным температурным параметром – степенью регенерации σ . С повышением степени регенерации однозначно увеличивается термический КПД установки. Однако при этом нужно увеличивать поверхность теплообмена либо интенсифицировать процесс теплопередачи в аппарате, что, несомненно, приведет к росту стоимости теплооб-

менника. С другой стороны, возрастает аэродинамическое сопротивление, которое вносит теплообменник в тракт установки. На преодоление сопротивления по воздуху расходуется часть полезной мощности, которую создает турбина, а сопротивления по тракту выхлопа уменьшают эту мощность. Все эти факторы будут влиять на уменьшение как эффективной мощности установки, так и эффективного КПД, который в результате может даже оказаться ниже, чем в базовой установке без регенератора. Другой проблемой применения регенерации является низкая эксплуатационная надежность воздухоподогревателей. Характерное растрескивание поверхности в процессе эксплуатации обуславливается высокими температурами теплоносителей, жаропрочностью материалов, температурными напряжениями, переменными нагрузками. Эти процессы характерны как для обычных трубчатых воздухоподогревателей, так и для высокоэффективных пластинчатых и компактных аппаратов.

Поэтому в данной работе поставлена задача повышения эффективности стационарной энергетической газотурбинной установки с учетом моделирования теплогидравлических процессов в регенераторе-воздухоподогревателе и анализа их влияния на эффективность установки в целом.

Методика исследований. Воздухоподогреватели газотурбинных установок имеют широкий спектр конструкций и компоновок. Теплообменники могут быть как обычными трубчатыми, так и более эффективными – трубчато-ребристыми, пластинчатыми, пластинчато-ребристыми, профильными и пр. Основное требование для воздухоподогревателей транспортных ГТУ – это обеспечение заданной эффективности при высокой компактности и минимальных массе и габаритах. В стационарных энергетических ГТУ широко применяются трубчатые теплообменники с перекрестным или смешанным течением теплоносителей, которые komponуются из гладких или высокоэффективных оребренных труб. Такие аппараты имеют низкую компактность, большие массу и габариты, но более

дешевые и обладают меньшим аэродинамическим сопротивлением по сравнению с другими.

В качестве объекта исследования в данной работе рассматривается стационарная энергетическая ГТУ марки ГТ 35 ХТГЗ, имеющая такие номинальные параметры [1]: электрическая мощность 32 МВт; КПД 23,2 %; степень повышения давления $\pi_k = 6,5$; расход воздуха 215 кг/с; частота вращения силового вала 3000 об/мин; температура газов перед турбиной 780°C; температура выхлопных газов 430°C; регенерация теплоты отсутствует. Для анализа приняты стандартные параметры окружающей среды, а также потери давления на входе и выходе 1500 Па.

Как видно из характеристик этой установки, она имеет все предпосылки для введения регенерации, а именно: высокая температура уходящих газов, малый π_k и самая главная – низкий КПД (23,2 %).

Рассмотрим в качестве регенератора наиболее простой, дешевый и доступный вариант – трубчатый теплообменник.

В трубчатых регенераторах воздух чаще пропускается по трубкам, а газы обтекают трубки извне [2]. Это дает следующие преимущества [2]: корпус регенератора выходит значительно более легким, так как он рассчитывается на давление уходящих газов, по величине близкое к атмосферному давлению; поверхность нагрева со стороны газов легче очищать от нагара и сажи. Однако из соображения уменьшения аэродинамического сопротивления, повышения прочности и легкости очистки поверхности также широко применяются трубчатые регенераторы, где горячие газы находятся внутри труб, а воздух – снаружи [1].

У регенераторов корпус, трубные доски и сами трубки чаще изготавливаются из углеродистой или нержавеющей стали [2]. Но для трубок нередко применяются и сплавы, например, алюминиевая бронза [2]. Для интенсификации теплообмена в трубчатых регенераторах иногда делается внешнее, а также внутреннее оребрение и турбулизаторы [2].

Для рассматриваемого регенератора в качестве поверхности теплообмена выбраны гладкие трубы из стали 20. Для предотвращения высокотемпературной коррозии, повышения жаропрочности и облегчения чистки диаметр труб выбран увеличенным до 57 мм с толщиной стенки 3,5 мм и шероховатостью 0,06 мм. Разбивка пучка – шахматная, по равностороннему треугольнику с шагом разбивки 80 мм. Число труб и формирование размеров пучка определялось исходя из рекомендуемых скоростей воздуха (10÷20 м/с) и газов (15÷40 м/с) [1]. Максимальные скорости принима-

лись: для воздуха – 15 м/с, для газов – 40 м/с.

Анализ проведен для принципиально отличающихся, но как было сказано ранее, встречающихся двух вариантов таких теплообменников [3]:

1) газы снаружи омывают пучок труб, совершая несколько ходов, воздух движется внутри труб;

2) газы движутся внутри труб, воздух снаружи омывает пучок труб, совершая несколько ходов.

Варианты компоновки существенно отличаются, так как плотность воздуха в исследуемой установке превосходит плотность газов более чем в 8 раз, а массовые расходы сред близки друг к другу.

Для варианта, где газы внутри труб, принято: количество труб в ряду – 104 шт., число рядов труб по ходу воздуха – 50 шт. Количество труб в одном ходу – 5200 шт., длина труб в ходу 1,75 м; площадь наружной поверхности одного хода – 1637,4 м².

Для варианта, где газы снаружи труб принято: количество труб в ряду – 131 шт., число рядов труб по ходу воздуха – 16 шт. Количество труб в одном ходу – 2096 шт., длина труб в ходу 3,5 м; площадь наружной поверхности одного хода – 1318,6 м².

Для анализа были сформированы две математические модели и алгоритмы, которые непосредственно связаны друг с другом:

1) расчет параметров и эффективности газотурбинной установки;

2) расчет параметров и эффективности воздухоподогревателя с учетом распределения локальных теплогидравлических параметров и условий эксплуатации.

Математическая модель и алгоритм расчета регенератора предусматривает разбивку теплообменника на дискретные элементы (микротеплообменники) [4]. Число элементов разбивки на длине труб одного хода принято равным 10 (что обеспечивает достаточную точность расчета [4]).

Свойства теплоносителей, параметры теплоотдачи и теплопередачи [5] в каждом микротеплообменнике различны и зависят от особенностей компоновки аппарата, начальных участков и загрязнений. Расходы и скорости среды внутри каждого ряда труб определялись специально разработанным алгоритмом гидравлического расчета с использованием теории графов, где учитывались гидравлические и местные сопротивления [6].

Результаты исследований. Результаты анализа зависимости степени регенерации и эффективного КПД ГТУ от количества ходов в регенераторе приведены на рис. 1.

Как видно из рис. 1 при выбранных конструктивных параметрах ходов (секций) эффективность

регенераторов, т.е. степень регенерации, не отличается. Эффективный КПД ГТУ сначала повышается за счет увеличения степени регенерации, а затем падает за счет увеличения потерь давления в регенераторе. Причем максимальный КПД в варианте,

где газы снаружи, составил 27,83 % в четырехсекционном аппарате площадью 5274,7 м², в варианте, где газы внутри труб, составил 29,08 % в шестисекционном аппарате площадью 9824,2 м².

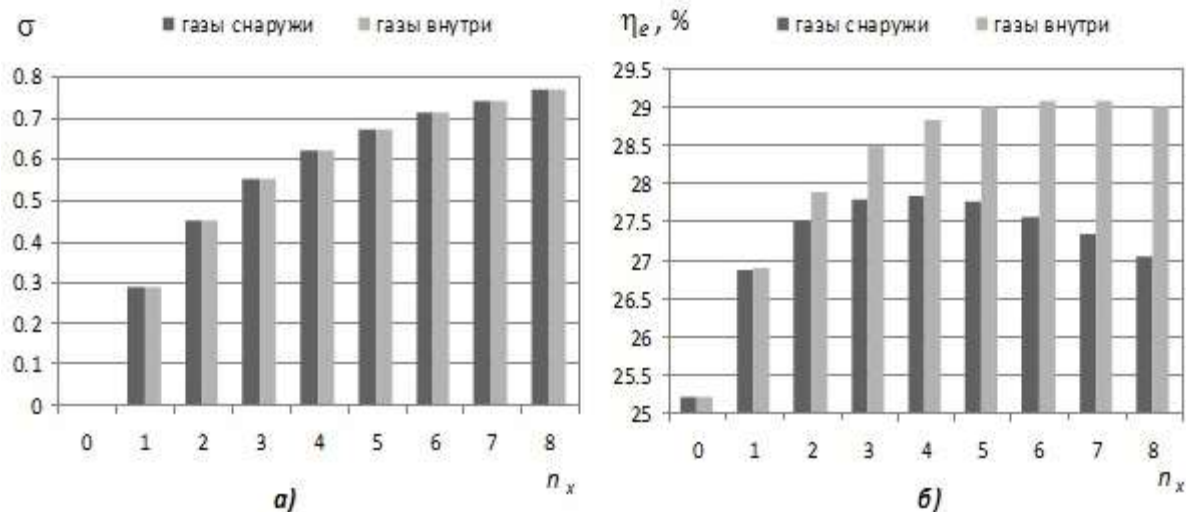


Рис. 1. Показатели эффективности регенератора и установки в зависимости от количества ходов (секций) в регенераторе:
а – степень регенерации; б – эффективный КПД ГТУ

На рис. 2 представлена подобная зависимость степени регенерации и эффективного КПД ГТУ, но уже от общей площади поверхности аппаратов. Из рис. 2 видно, что вариант, где газы снаружи, эффективнее с точки зрения теплообмена, а вариант, где газы внутри, лучше по термодинамической эффективности. Это объясняется более весомым влиянием абсолютных величин потерь давления на выхлопе на эффективность цикла ГТУ по сравнению с потерями после компрессора.

Следующим этапом исследования было определение влияния перепуска горячих газов мимо регенератора. При этом уменьшаются потери давления по тракту выхлопа установки, что положительно влияет на ее КПД, однако уменьшается и эффективность самого воздухоподогревателя (степень регенерации), что будет снижать КПД установки. Таким образом, присутствует задача оптимизации.

На рис. 3 показаны результаты исследования для базовых (выбранных) и других вариантов компоновки регенератора. Как видно из результатов анализа, в базовом варианте, где газы внутри труб, максимум КПД установки совпадает с долей перепуска $\phi=0$ (т.е. оптимум отсутствует). В вариантах, где газы снаружи труб, максимальные значения присутствуют с долей перепуска $\phi = 0,2 \div 0,3$; причем наибольший КПД установки 28,0 % в пятиходовом варианте. Следует отметить, что это повы-

шение КПД незначительное.

Далее было исследовано влияние компоновки на возникающие опасные разности температур стенки (на стыке ходов в одной точке на одной трубе) и на максимальную температуру стенки. Как показал анализ результатов дискретного расчета, максимальные разности температур в базовых вариантах составили 28,9÷33,6 °С при максимальных температурах стенки 394,4÷396,2 °С. В вариантах с перепуском газов максимальные разности температур увеличиваются на 10 °С при доли перепуска $\phi=0,2 \div 0,3$ (как раз, где присутствует максимальный КПД). Далее с увеличением доли перепуска максимальные разности температур снижаются, также снижаются максимальные температуры стенки.

Выводы. Разработаны математические модели, методики и алгоритмы системного анализа газотурбинной установки с учетом эффективности работы регенератора-воздухоподогревателя и распределения в нем локальных теплогидравлических параметров. Для стационарной газотурбинной установки ГТ 35 ХТГЗ разработана конструкция трубчатого регенератора. Расчет произведен в двух вариантах: газы движутся снаружи труб или внутри них. Найден максимальный эффективный КПД, который можно получить с использованием регенератора выбранной конструкции, который в варианте, где газы снаружи, составил 27,83 % (4 хода, площадь 5274,7 м²), в варианте, где газы внутри

труб, составил 29,08 % (6 ходов, площадь 9824,2 м²). Экономия топлива на номинальном режиме составит до 2100 кг.у.т. в час. Таким образом, можно сделать вывод, что вариант, где газы снаружи, эффективнее с точки зрения теплообмена, а вариант, где газы внутри, лучше по термодинамической эффективности установки. Проведено ис-

следование целесообразности использования перепуска газов мимо регенератора с точки зрения повышения его надежности и экономичности установки. Представляется целесообразным в дальнейшем провести оптимизационные расчеты, где учесть баланс между экономией топлива и затратами на изготовление аппаратов.

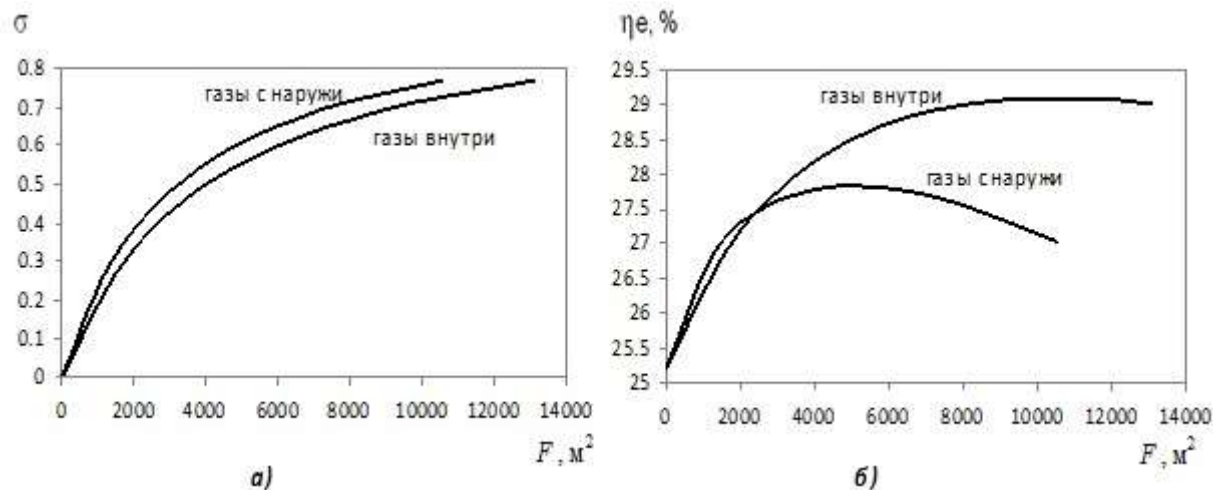


Рис. 2. Показатели эффективности регенератора и установки в зависимости от площади поверхности регенератора

а – степень регенерации; б – эффективный КПД ГТУ

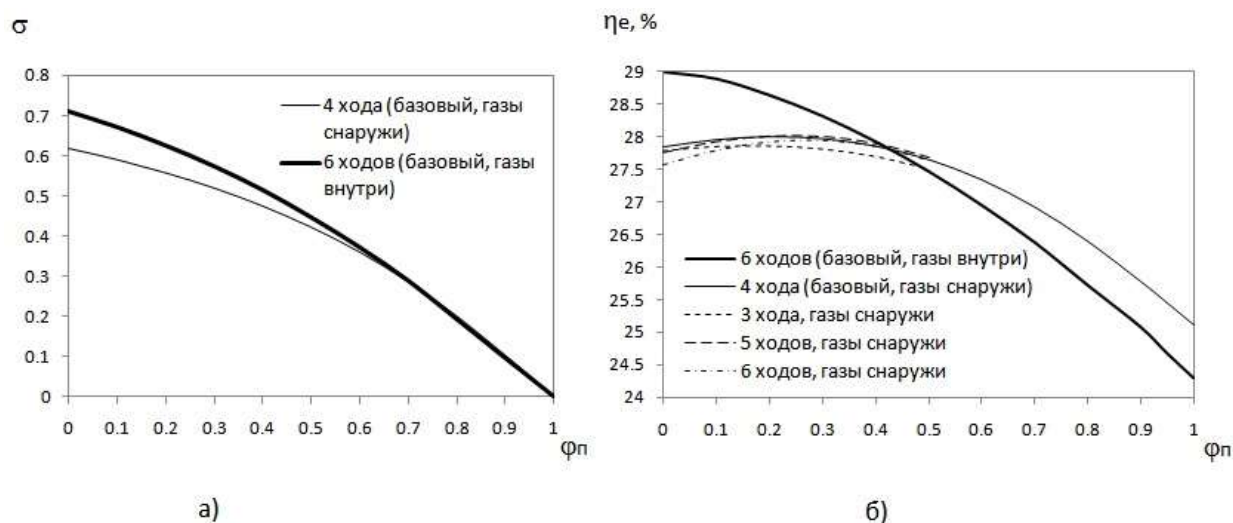


Рис. 3. Показатели эффективности регенератора и установки в зависимости от доли перепуска горячих газов мимо регенератора:

а – степень регенерации; б – эффективный КПД ГТУ

Список литературы:

1. Стационарные газотурбинные установки: справочник / [Л. В. Арсеньев, В. Г. Тырышкин, И. А. Богов и др.] ; под ред. Л. В. Арсеньева и В. Г. Тырышкина. – Л. : Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1989. – 543 с. 2. Нигматулин И. Н. Тепловые двигатели / Нигматулин И. Н., Шляхин П. Н., Цевев В. А. ; под ред. И. Н. Нигматулина. – М. : Высшая школа, 1974. – 375 с. 3. Ганжа А. Н. Повышение эффективности стационарной ГТУ с учетом моделирования процессов в регенераторе-воздухоподогревателе / А. Н. Ганжа, Н. А. Марченко // Газотурбинные техно-

гии. – Рыбинск: ООО «Издательский дом «Газотурбинные технологии», 2011. – № 9. – С. 36–39. 4. Братута Е. Г. Удосконалена методика розрахунку температурних характеристик теплообмінних апаратів з перехресним плином та їх систем / Е. Г. Братута, А. М. Ганжа // Енергетика: економіка, технології, екологія. – 2008. – № 1. – С. 61–65. 5. Теплопередача и гидравлическое сопротивление: справочник / [С. С. Кутателадзе]. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 367 с. 6. Идельчик И. Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям / Идельчик И. Е. – М. : Машиностроение, 1975. – 559 с.

Bibliography (transliterated):

1. Stacionarnye gazoturbinnye ustanovki: spravochnik / [L. V. Arsen'ev, V. G. Tyryshkin, I. A. Bogov i dr.] ; pod red. L. V. Arsen'eva i V. G. Tyryshkina. – L. : Mashinostroyeniye. Leningr. otd-nie, 1989. – 543 s. 2. Nigmatulin I. N. Teplovyye dvigateli / Nigmatulin I. N., Shljahin P. N., Cenev V. A. ; pod red. I. N. Nigmatulina. – M. : Vysshaya shkola, 1974. – 375 s. 3. Ganzha A. N. Povysheniye jeffektivnosti stacionarnoy GTU s uchetom modelirovaniya processov v regeneratore-vozdushopodogrevatele / A. N. Ganzha, N. A. Marchenko // Ga-zoturbinnye tehnologii. – Rybinsk: OOO «Izdatel'skiy dom

«Gazoturbinnye tehnologii», 2011. – № 9. – S. 36–39. 4. Bratuta E. G. Udoskonalena metodika rozrahunku temperaturnih harakteristik teploobminnih aparativ z perehresnim plinom ta ih sistem / E. G. Bratuta, A. M. Ganzha // Energetika: ekonomika, tehnologii, ekologiya. – 2008. – № 1. – S. 61–65. 5. Teploperedacha i gidravlicheskie soprotivleniya: spravochnik / [S. S. Kutateladze]. – M. : Jenergoatomizdat, 1990. – 367 s. 6. Idel'chik I. E. Spravochnik po gidravlicheskim soprotivleniyam / Idel'chik I. E. – M. : Mashinostroyeniye, 1975. – 559 s.

Поступила в редакцию 13.05.2013

Ганжа Антон Николаевич – доктор техн. наук, доцент, профессор кафедры теплотехники и энергоэффективных технологий Национального технического университета «Харьковский политехнический институт», Харьков, Украина, e-mail: ganzha@kpi.kharkov.ua.

Марченко Наталья Андреевна – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры системного анализа и управления Национального технического университета «Харьковский политехнический институт», Харьков, Украина, e-mail: nmarchenko@kpi.kharkov.ua.

**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ СТАЦІОНАРНОЇ ГТУ ЗА РАХУНОК РЕГЕНЕРАЦІЇ ТЕПЛОТИ
З МОЖЛИВИМ ПЕРЕПУСКОМ ГАЗІВ**

А.М. Ганжа, Н.А. Марченко

Розроблено математичні моделі та алгоритми системного аналізу газотурбінної установки з урахуванням ефективності роботи повітропідігрівника і розподілу в ньому локальних теплогідрравлічних параметрів. Для стаціонарної газотурбінної установки розроблені та проаналізовані варіанти конструкції трубчастого регенератора. Визначено максимальний ефективний ККД установки, який можна одержати з використанням регенератора обраної конструкції.

**IMPROVING THE EFFICIENCY OF THE INTRODUCTION OF A STATIONARY GAS TURBINE HEAT
RECOVERY FROM THE POSSIBLE GAS BYPASS**

A.N. Ganzha., N.A. Marchenko

The mathematical models and algorithms for system analysis of gas turbine performance-air heater and local distribution in its thermal and hydraulic parameters are developed. The complex design of the tube regenerator for a stationary gas turbine is developed and analyzed. The maximum effective efficiency of the installation, which can be obtained using the chosen design of the regenerator, is determined.