

ЭНЕРГО- И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ:

промышленность и транспорт

№ 1 (34)
2021



16+

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ





Издается
с января 2004 г.

Энерго- и ресурсосбережение: промышленность и транспорт научно-технический журнал

ISSN 2500-0586

Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору
в сфере связи, информационных технологий и массовых
коммуникаций (Роскомнадзор)
ПИ № ФС77-64543 от 22 января 2016 г.

Главный редактор журнала
В. И. Лысак – академик РАН,
д-р техн. наук, профессор

Редакционная коллегия:

И. И. Артюхов – д.т.н., проф., СГТУ
им. Гагарина Ю. А., г. Саратов
Е. В. Балакина – д.т.н., проф., ВолгГТУ
А. В. Баранов – д.ф.-м.н., проф.,
РГУ нефти и газа, г. Москва
А. Б. Голованчиков – д.т.н., проф., ВолгГТУ
А. Е. Городецкий – д.т.н., проф., ИПМаш
РАН, г. Санкт-Петербург
А. П. Дармания – д.т.н., проф. ВГАУ,
г. Волгоград
А. М. Иванов – д.т.н., проф.,
МГТУ (МАДИ), г. Москва
А. В. Келлер – д.т.н., проф. НАМИ, г. Москва
В. В. Коротаяев – д.т.н., проф., ИТМО,
г. Санкт-Петербург
Г. О. Котиев – д.т.н., проф., МВТУ
им. Н. Э. Баумана, г. Москва
А. А. Львов – д.т.н., проф., СГТУ
им. Гагарина Ю. А., г. Саратов
Мертен Клеменс – д.т.н., проф.,
университет г. Штутгарт, Германия
В. А. Марков – д.т.н., проф., МВТУ
им. Н. Э. Баумана, г. Москва
А. Е. Новиков – д.т.н., проф., ВолгГТУ
Б. В. Скворцов – д.т.н., проф., СГАУ
им. академика С. П. Королева, г. Самара
Е. А. Федянов – д.т.н., проф., ВолгГТУ
В. Т. Фомичев – д.т.н., проф., ВолгГТУ
А. Н. Шилин – д.т.н., проф., ВолгГТУ

Ответственный секретарь
П. С. Васильев – к.т.н., доц., ВолгГТУ

Журнал распространяется
по подписке.
Индекс журнала по каталогу
Агентства «Роспечать»
для Российской Федерации –
94193(ОК+ЭК).

Тел. издательства ВолгГТУ:
+7 (8442) 24-84-08
+7 (8442) 24-84-05
e-mail: zavrio@vstu.ru

№ 1 (34)
Март
2021

УЧРЕДИТЕЛЬ:
ФГБОУ высшего образования
«Волгоградский государственный технический
университет»
Периодичность: четыре раза в год

Адрес редакции:
РФ, 400005, Волгоград, пр. В.И. Ленина, 28
Гл. редактор: телефон: +7 (8442) 23-00-76
e-mail: rector@vstu.ru

Отв. секретарь: телефон: +7 (8442) 24-84-31
e-mail: pahp@vstu.ru

Официальный сайт Учредителя: www.vstu.ru

Печатается по решению редакционно-издательского совета
Волгоградского государственного технического университета

Авторское право на журнал в целом принадлежит
Учредителю, на отдельные статьи – сохраняется за авторами

*Перепечатка из журнала «Энерго- и ресурсосбережение:
промышленность и транспорт» категорически запрещена без
оформления договора в соответствии с действующим
законодательством РФ*

*При перепечатке материалов ссылка на журнал «Энерго-
и ресурсосбережение: промышленность и транспорт» обязательна*

Статьи печатаются бесплатно



Published since
January 2004 г.

ISSN 2500-0586

Editor-in-chief

V. I. Lysak – Academician of
RAS Academician of RAS,
D. Sc. (Technical), Professor

Editorial Board:

I. I. Artuchov – D. Sc. (Engineering), Prof.,
SSTU, Saratov
E. V. Balakina – D. Sc. (Engineering),
Prof., VSTU, Volgograd
A. V. Baranov – D. Sc. (Physical and Math.),
Prof., Gubkin University, Moscow
A. B. Golovanchikov – D. Sc. (Engineering),
Prof., VSTU, Volgograd
A. E. Gorodetskij – D. Sc. (Engineering),
Prof., IPME, St. Petersburg
A. P. Darmanyan – D. Sc. (Engineering),
Prof., VSAU, Volgograd
A. M. Ivanov – D. Sc. (Engineering), Prof.,
MADI, Moscow
A. V. Keller – D. Sc. (Engineering), Prof.,
NAMI, Moscow
V. V. Korotaev – D. Sc. (Engineering), Prof.,
ITMO University, St. Petersburg
G. O. Kotiev – D. Sc. (Engineering), Prof.,
BMSTU, Moscow
A. A. L'vov – D. Sc. (Engineering), Prof.,
SSTU, Saratov
M. Clemens – D. Sc. (Engineering), Prof.,
University of Stuttgart, Germany
V. A. Markov – D. Sc. (Engineering), Prof.,
BMSTU, Moscow
A. E. Novikov – D. Sc. (Engineering), Prof.,
VSTU, Volgograd
B. V. Skvortsov – D. Sc. (Engineering), Prof.,
Samara University, Samara
E. A. Fedyanov – D. Sc. (Engineering), Prof.,
VSTU, Volgograd
B. T. Fomichev – D. Sc. (Engineering),
Prof., VSTU, Volgograd
A. N. Shilin – D. Sc. (Engineering),
Prof., VSTU, Volgograd

Executive Secretary
P. S. Vasilyev – PhD, Associate Prof.

The journal is distributed by subscription.
Index of the journal in the catalogue
of the Agency «Rospechat» for the Russian
Federation – 94193(OK+OK).

VSTU Publisher tel.:

+7 (8442) 24-84-08

+7 (8442) 24-84-05

e-mail: zavrio@vstu.ru

© Volgograd State Technical University,
«Energo- i resursosberezhenie: promyshlennost' i transport», 2021

Energo- i resursosberezhenie: Promyshlennost' i transport (Energy and Resource Saving: Industry and Transport) science-technical journal

Journal is registered in the Federal Service for supervision
of communications, information technology and mass media
(Roscomnadzor) registration certificate:
ПН .N° (ФЧ77-64543, registration date: 22 January 2016

№ 1 (34)
March
2021

FOUNDER:

**Federal State Budgetary Educational Institution of Higher
Education «Volgograd State Technical University»**

Periodicity: four times per year

Editorial office address:

Russia, 400005, Volgograd, Lenin avenue, 28. Editor-In-Chief:
tel.: +7 (8442) 23-00-76 e-mail: rector@vstu.ru

Executive Secretary: +7 (8442) 24-84-31 e-mail:
pahp@vstu.ru

Official website: www.vstu.ru

Published by the decision of editorial review board of Volgograd State
Technical University

***The copyright for the journal in general belongs to the Founder, for separate
articles – retained by the authors.***

*Reprint from the journal «Energo- i resursosberezhenie: promyshlennost'
i transport » is strongly forbidden -without conclusion of an agreement in accord-
ance with the current legislation of the Russia Federation.*

*When reprint the materials, the citation to the journal «Energo- i
resursosberezhenie: promyshlennost' i transport» is obligatory*

The articles are published for free.

АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ

Быкадоров В. В. 18
Васильев П. С. 10
Голованчиков А. Б. 6
Данилейченко А. А. 18
Дудников Р. Д. 27
Захаров Е. А. 15, 27
Искалиев А. И. 21
Косенко В. В. 21
Левин Ю. В. 27, 30

Любченко Д. И. 18
Меренцов Н. А. 6
Прохоренко Н. А. 6
Сафаров Э. Г. 15
Тишина П. В. 10
Федянов Е. А. 15, 21, 27, 30
Чёрикова К. В. 10
Шадрин А. И. 30

AUTHOR INDEX

Bykadorov V. V. 18
Danileychenko A. A. 18
Dudnikov R. D. 27
Fedyanov E. A. 15, 21, 27, 30
Golovanchikov A. B. 6
Iskaliev A. I. 21
Kosenko V.V. 21
Levin Yu. V. 27, 30
Lyubchenko D. I. 18

Merentsov N. A. 6
Prokhorenko N. A. 6
Safarov E. G. 15
Shadrin A. I. 30
Tchyorickowa X. V. 10
Tishina P. V. 10
Vasilyev P. S. 10
Zakharov E. A. 15, 27

СОДЕРЖАНИЕ

Часть 1. ПРОМЫШЛЕННОСТЬ

Голованчиков А. Б., Прохоренко Н. А., Меренцов Н. А.

Сравнение поверхностей массопереноса паровой (газовой) и жидкой фазы в тарельчатой колонне с кольцевыми туннельными колпачками.....	6
---	---

Васильев П. С., Чёрикова К. В., Тишина П. В.

Экспериментальное определение удерживающей способности поропластовых насадок.....	10
--	----

Часть 2. ТРАНСПОРТ

Захаров Е. А., Сафаров Э. Г., Федянов Е. А.

Энергетический баланс системы термохимической рекуперации теплоты автомобильного двигателя, работающего на пропане.....	15
--	----

Любченко Д. И., Быкадоров В. В., Данилейченко А. А.

Повышение ремонтпригодности лопаток компрессоров газотурбинных двигателей, имеющих износ высокопрочных защитных покрытий.....	18
---	----

Косенко В. В., Федянов Е. А., Исканиев А. И.

Анализ изменения эксплуатационных показателей колесного сельскохозяйственного трактора при переоборудовании на гусеничный ход.....	21
--	----

Захаров Е. А., Дудников Р. Д., Левин Ю. В., Федянов Е. А.

Оценка влияния добавок синтез-газа в бензовоздушную смесь на показатели роторно-поршневого двигателя.....	27
--	----

Левин Ю. В., Федянов Е. А., Шадрин А. И.

Моделирование образования оксидов азота в роторно-поршневых двигателях.....	30
--	----

К сведению авторов.....	35
-------------------------	----

CONTENTS

Part 1. INDUSTRY

<i>Golovanchikov A. B., Prokhorenko N. A., Merentsov N. A.</i> COMPARISON OF THE MASS TRANSFER SURFACES OF THE STEAM (GAS) AND LIQUID PHASE IN THE DISH COLUMN WITH RING TUNNEL CAP.....	6
<i>Vasilyev P. S., Tchyorickowa X. V., Tishina P. V.</i> EXPERIMENTAL DETERMINATION OF THE RETENTION CAPACITY OF POROUS PLASTIC PACKING.....	10

Part 2. TRANSPORT

<i>Zakharov E. A., Safarov E. G., Fedyanov E. A.</i> ENERGY BALANCE OF THE THERMOCHEMICAL HEAT RECOVERY SYSTEM OF A PROPANE FUELED AUTOMOTIVE ENGINE.....	15
<i>Lyubchenko D. I., Bykadorov V. V., Danileychenko A. A.</i> IMPROVING THE MAINTAINABILITY OF COMPRESSOR BLADES OF GAS TURBINE ENGINES WITH WEAR OF HIGH-STRENGTH PROTECTIVE COATINGS.....	18
<i>Kosenko V. V., Fedyanov E. A., Iskaliev A. I.</i> ANALYSIS OF CHANGES OF OPERATIONAL INDICATORS OF WHEELED AGRICULTURAL TRACTOR DURING IT'S CONVERSION INTO TRACKED.....	21
<i>Zakharov E. A., Dudnikov R. D., Levin Yu. V., Fedyanov E. A.</i> ESTIMATION OF THE INFLUENCE OF SYNTHESIS-GAS ADDITIVES IN A GAS-AIR MIXTURE ON THE INDICATORS OF A ROTARY PISTON ENGINE.....	27
<i>Levin Yu. V., Fedyanov E. A., Shadrin A. I.</i> SIMULATION OF NITROGEN OXIDE FORMATION IN ROTARY PISTON ENGINES.....	30

ПРОМЫШЛЕННОСТЬ

УДК 66.048.3.069.833

А. Б. Голованчиков, Н. А. Прохоренко, Н. А. Меренцов

СРАВНЕНИЕ ПОВЕРХНОСТЕЙ МАССОПЕРЕНОСА ПАРОВОЙ (ГАЗОВОЙ) И ЖИДКОЙ ФАЗЫ В ТАРЕЛЬЧАТОЙ КОЛОННЕ С КОЛЬЦЕВЫМИ ТУННЕЛЬНЫМИ КОЛПАЧКАМИ

Волгоградский государственный технический университет

e-mail: natasha292009@yandex.ru

Приводится описание конструкции тарельчатой и насадочной ректификационной колонны с кольцевыми туннельными колпачками, увеличивающими поверхность массопередачи на 65 % по сравнению с типовыми туннельными колпачками, установленными параллельно друг другу, кроме того сливной патрубков заменен переливными трубками с разбрызгивающими устройствами, установленными равномерно по окружностям между кольцевых туннельных колпачков. Проведено сравнение поверхности тепло- и массопередачи паровых струй, образующихся на выходе из прорезей колпачков, с поверхностью капель жидкости, создаваемых разбрызгивающими устройствами трубок в межтарельчатом объеме.

Ключевые слова: массопередача, поверхность контакта фаз, туннельный кольцевой колпачок, струя пара, капли жидкости.

A. B. Golovanchikov, N. A. Prokhorenko, N. A. Merentsov

COMPARISON OF THE MASS TRANSFER SURFACES OF THE STEAM (GAS) AND LIQUID PHASE IN THE DISH COLUMN WITH RING TUNNEL CAP

Volgograd State Technical University

A description of the design of a disc-shaped and packed distillation column with annular tunnel caps that increase the mass transfer surface by 65% compared to typical tunnel caps installed parallel to each other is carried out, in addition, the drain pipe is replaced by overflow pipes with spray devices installed evenly around the circumferences between the annular tunnel caps. A comparison is made of the surface of heat and mass transfer of steam jets formed at the outlet from the slots of the caps, from the surface of liquid droplets created by the spraying devices of the tubes in the interlude volume.

Keywords: mass transfer, phase contact surface, tunnel ring cap, steam jet, liquid droplets.

Как известно, основное уравнение массопередачи [1, 2] имеет вид:

$$\Delta M = k_F \cdot F \cdot \Delta y_{cp},$$

где ΔM – расход пара; Δy_{cp} – средняя движущая сила для паровой (газовой) фазы; k_F – поверхностный коэффициент массопередачи по паровой (газовой) фазе.

Обычно для интерпретации массообменных процессов с целью повышения ΔM стараются увеличить коэффициент массопередачи за счет вибрации, пульсации, вращения, турбулизации и т. п., а для увеличения локальной и средней движущих сил прибегают к увеличению или уменьшению давления, росту флегмового числа, повышению КПД.

Целью настоящей работы является увеличение массопередачи за счет повышения поверхности F и использования межтарельчатого объема для дополнительного тепло- и массообмена между каплями жидкостной дисперсной фазой и сплошной паровой фазой.

Первая часть цели достигается путем замены типового линейного расположения туннельных колпачков параллельных друг другу на круговое их расположение [3, 4]. Показано, что поверхность туннелей, а значит и струй пара, выходящих из прорезей колпачков увеличивается на 65 %.

Другой особенностью предлагаемой конструкции является использование межтарельчатого пространства для дополнительной тепло-

массопередачи от капель жидкости, создаваемых разбрызгивающими устройствами, соединенными с переливными трубками (рис. 1). Таким образом, создается искусственная инверсия фаз: сначала, как обычно, пар на тарелках, выходящих в виде струек, является дисперсной фазой, а жидкость на тарелках – сплошной, в межтарельчатом пространстве капли жидкости становятся дисперсной фазой, а пар (газ) – сплошной. Сравним поверхности струек пара

(газа), образующихся в прорезях туннельных колпачков, установленных на поверхности тарелок и капель жидкости.

На рис. 1 изображен общий вид в разрезе колонны для контактирования газа (пара) с жидкостью, на рис. 2 представлен вид сверху схемы конструкции тарелки, с кольцевыми S-образными туннельными колпачками и патрубками для слива жидкой фазы и ее разбрызгивания между тарелками.

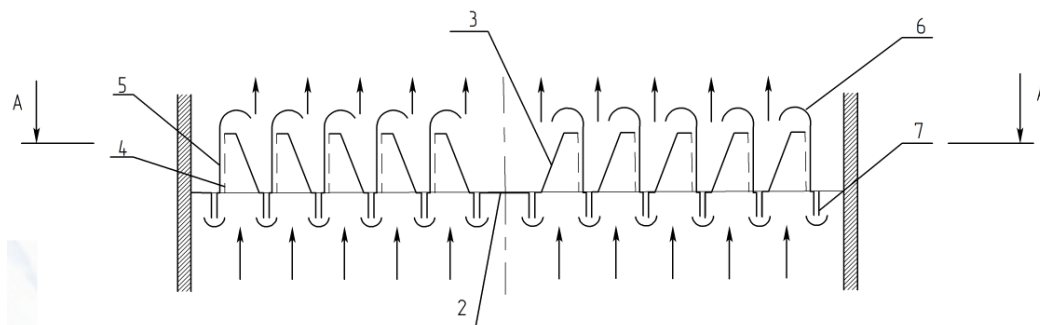


Рис. 1. Общий вид в разрезе колонны для контактирования газа (пара) с жидкостью

Колонна для контактирования газа с жидкостью содержит корпус 1, тарелки 2, состоящие из кольцевых S-образных элементов с одной глухой стенкой 3 и одной перфорированной вертикальной стенкой 4, вертикальных перегородок 5 с отбойным козырьком 6 и переливных устройств 7, представляющих собой трубки с разбрызгивающими устройствами в нижней части под тарелкой. S-образные элементы установлены по окружности.

родок 5 с отбойным козырьком 6 и переливных устройств 7, представляющих собой трубки с разбрызгивающими устройствами в нижней части под тарелкой. S-образные элементы установлены по окружности.

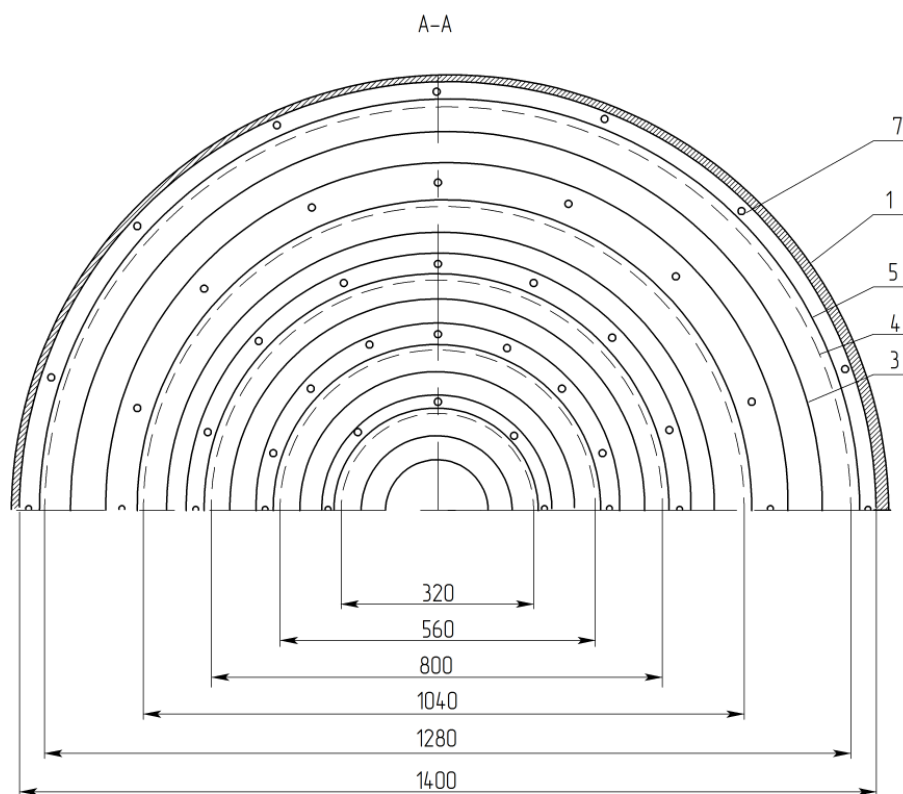


Рис. 2. Вид сверху предлагаемой конструкции тарелки для контактирования газа с жидкостью

Таких окружностей, образованных *S*-образными элементами, может быть несколько на тарелке (на рис. 1 и 2 показан пример колонны с пятью окружностями, образованными *S*-образными элементами), при этом данные окружности, образованные *S*-образными элементами, расположены осесимметрично с одинаковым зазором между смежными окружностями с *S*-образными элементами, в котором равномерно расположены переливные устройства 7, представляющие собой трубки. *S*-образные элементы и вертикальные перегородки 5 с помощью специальных пластин (на рис. 1 не показаны) соединяются между собой и образуют полотно тарелки 2. При этом исключается необходимость в каркасе для крепления элементов тарелки 2. Газовая (паровая) фаза проходит по каналам, образованным

глухой стенкой 3 и перфорированной вертикальной стенкой 4, установленные по окружности. После прохождения канала, газ (пар) попадает в каналы, образованные перфорированными вертикальными стенками 4 *S*-образных элементов, установленные по окружности. После чего газ (пар) попадает в жидкость, находящуюся в каналах, образующихся между перфорированной вертикальной стенкой 4 и вертикальными перегородками 5, установленные по окружности. Образованная газо(паро)-жидкостная эмульсия (пена), отбрасывается отбойными козырьками 6 к переливному устройству 7 в канал.

В работе [1, стр. 126] приведен пример расчета тарельчатой ректификационной колонны. Исходные и справочные данные этого примера и расчетные параметры приведены в табл. 1.

Таблица 1

Исходные и справочные данные и расчетные параметры исчерпывающей части тарельчатой ректификационной колонны для бинарной смеси «бензол – толуол» [1, 2]

№	Наименование параметра	Размерность	Обозначение	Величина параметра
1	2	3	4	5
Исходные и справочные данные				
1.	Производительность: а) по паровой фазе б) по жидкой фазе	кг/час кг/час	G_n G_w	12500 14050
2.	Средняя плотность : а) по паровой фазе б) по жидкой фазе	кг/м^3 кг/м^3	ρ_n ρ_w	2,91 800
3.	Средний диаметр струек пара	мм	d_n	3
4.	Длина струек пара	мм	l	30
5.	Средний диаметр капель жидкости	мм	d_w	1
Расчетные параметры				
1.	Объемная производительность: а) по пару б) по жидкости	$\text{м}^3/\text{час}$ $\text{м}^3/\text{час}$	q_n q_w	4290 17,56
2.	Доля поверхности капель жидкости по отношению к поверхности струек газа	%	f_0	7,4

По исходным и справочным данным табл. 1 проведен оценочный расчет увеличения поверхности массопередачи за счет использования межтарельчатого объема с образованием в них капель жидкости и сплошной паровой фазой пара. Объем одной струйки пара, выходящей из прорезей колпачка – цилиндра диаметром $d_d = 3$ мм и $l_d = 10d$:

$$V_n = 10\pi d_n^3 / 4.$$

Объем одной сферической капли, выходящей из разбрызгивающего устройства и имеющей диаметр d_w :

$$V_w = \pi d_w^3 / 6.$$

Численный расход струек пара:

$$N_n = q_n / V_n.$$

Численный расход капель жидкости:

$$N_w = q_w / V_w.$$

Производительность по поверхности струек пара:

$$f_n = N_n (\pi \cdot d_n \cdot l) = N_{dn} (10 \cdot \pi \cdot d_n^2).$$

Производительность по поверхности капель жидкости:

$$f_w = N_w \cdot \pi \cdot d_w^2,$$

где $\pi \cdot d_w^2$ – поверхность сферы капли.

Доля поверхности капель жидкости по отношению к поверхности струек пара:

$$f_0 = \frac{f_w}{f_d} = \left[6 \left(\frac{q_w}{q_n} \right) \left(\frac{d_n}{d_w} \right) \right] \cdot 100 \% . \quad (1)$$

Таким образом, кольцевая установка туннельных колпачков на массообменной тарелке в исчерпывающей части колонны вместо их параллельной установки в ряды, позволяет увеличить поверхность струек жидкости, выходящих из прорезей колпачков на 65 %, а разбрызгивание мелких капель в межтарельчатом объеме увеличивает поверхность массопередачи еще на 7,4 %.

Общая эффективность предлагаемой конструкции тарельчатой ректификационной колонны с кольцевыми туннельными колпачками ориентировочно составляет около 73 %.

Как видно из последней формулы, эффективность массопередачи возрастает за счет использования поверхности капель тем больше, чем больший объемный расход жидкости по сравнению с объемным расходом пара.

Для укрепляющей части колонны отношение объемных расходов флегмы (жидкой фазы) и паровой фазы (флегмы и дистиллят) почти

в 1df раза меньше, поэтому увеличение поверхности массопередачи за счет капель жидкой фазы не превышает 4 %.

Проведем по уравнению (1) сравнительные расчеты поверхностей жидких капель абсорбента и струек газовой фазы в тарельчатой абсорбционной колонне при поглощении двуокиси углерода водой. Исходные и справочные данные взяты из примера расчета [1, стр. 411] и представлены в табл. 2.

Определим объемный расход газа в абсорбере при рабочем давлении в 16,5 ат, по формуле:

$$q_n = \frac{q_v \cdot 1,033}{16,5} = 313 \text{ м}^3/\text{час}.$$

Определяем по формуле (1) относительную долю поверхности капель абсорбента в тарельчатой абсорбционной колонне по отношению к поверхности струек газа:

$$f_0 = \left[6 \left(\frac{650}{313} \right) \left(\frac{1}{1} \right) \right] = 12,4 ,$$

то есть поверхность капель, образующихся после разбиения абсорбента в межтарельчатом пространстве абсорбера, более чем в 12 раз превышает поверхность струек газа, образующихся на выходе из прорезей туннельных колпачков на тарелках. Соответственно эффективность массообменных процессов в межтарельчатом пространстве на поверхности капель абсорбента более чем на порядок выше, чем на тарелках на поверхности струек газа.

Таблица 2

Исходные и справочные данные для расчета доли поверхности капель воды, образующихся в межтарельчатом пространстве абсорбционной колонны на выходе из разбрызгивающих устройств переливных трубок (рис. 1), по отношению к поверхности струек, образующихся на выходе из прорезей кольцевых туннельных колпачков на тарелках

№	Наименование параметра	Размерность	Обозначение	Величина параметра
Справочные данные				
1	Давление	ат	p	16,5
2	Объемная производительность при атмосферном давлении и рабочей температуре по газу	м ³ /час	q_v	5000
3	Объемная производительность по абсорбенту – вода	м ³ /час	q_w	650
4	Средний диаметр струек газа		d_n	1
5	Средний диаметр капель абсорбента – вода		d_w	1
Расчетные параметры				
1	Объемная производительность по газу при рабочем давлении	м ³ /час	q_n	313
2	Доля поверхности капель абсорбента по отношению к поверхности струек газа	%	f_0	12,4

*Длина струек газа (пара) в расчетной формуле (1) не участвует, поэтому в табл. 2 не приводится.

**По сравнению с диаметром струек пара в ректификационной колонне (табл. 1) диаметр струек пара в абсорбционной колонне уменьшен в 3 раза из-за высокого давления.

Таким образом, разбрызгивание капель жидкости в тарельчатых ректификационных и абсорбционных колоннах может быть оценено по формуле (1). Если отношение объемных расходов жидкой и паровой (газовой) фаз более 0,1, то предлагаемую конструкцию тарельчатых колонн с заменой общего переливного устройства на локально и равномерно распределенные по площади тарелки между колпачками переливные трубки с разбрызгивающими устройствами использовать целесообразно (рис. 1). Такую конструкцию можно реализовывать и на обычных тарелках с круглыми колпачками или другими видами контактных элементов (ситчатые, беспровальные, клапанные, чешуйчатые тарелки). Кроме того, искусственно создаваемая инверсия фаз, когда на тарелках струи газа являются дисперсной фазой, а жидкость на тарелке – сплошной фазой и затем при тарельчатом объеме колонны они становятся дисперсной фазой, а пар (газ) сплошной способствует

обновлению поверхностей массопереноса, что также способствует интенсификации массообменных процессов, помимо увеличения площади контакта фаз.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Павлов, К. Ф. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии / К. Ф. Павлов, П. Г. Романков, А. А. Носков. – 10-е изд., перераб. и доп. – Москва: Альянс, 2013. – 576 с.
2. Скобло, А. И. Процессы и аппараты нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности / И. И. Скобло, И. А. Трегубова, Ю. К. Молоканов. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва: Химия, 1982. – 583 с.
3. П. м. 200099 Российская Федерация, МПК В01Д3/10, В01Д3/20 Колпачковая тарелка / Н. А. Прохоренко, А. Б. Голованчиков, Н. В. Шибитова, Р. С. Кочарян; ФГБОУ ВО ВолгГТУ. – 2020.
4. П. м. 200779 Российская Федерация, МПК В01Д3/20, В01Д3/30 Распределительная тарелка для тепломассообменных аппаратов / Н. А. Прохоренко, А. Б. Голованчиков, О. А. Залипаева, Н. В. Шибитова, Д. О. Смольская; ФГБОУ ВО ВолгГТУ. – 2020.

УДК 66.069.833

П. С. Васильев, К. В. Чёрикова, П. В. Тишина

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕРЖИВАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ПОРОПЛАСТОВЫХ НАСАДОК

Волгоградский государственный технический университет

e-mail: nestorvv@mail.ru

Приводится описание экспериментальной установки для исследования удерживающей способности поропластовых насадок. На основании математической обработки опытных данных получено уравнение для прогнозирования количества удерживаемой жидкости поропластовых насадок, учитывающее влияние их высокоразвитой внутренней пористой структуры.

Ключевые слова: поропластовая насадка, экспериментальная установка, удерживающая способность, прогноз.

P. S. Vasilyev, K. V. Tchorickowa, P. V. Tishina

EXPERIMENTAL DETERMINATION OF THE RETENTION CAPACITY OF POROUS PLASTIC PACKING

Volgograd State Technical University

There is defining of an experimental setup for studying the holding capacity of porous plastic packing. On the basis of mathematical processing of experimental data, an equation was obtained for predicting the amount of retained fluid in porous plastic packing, which takes into account the influence of their highly developed internal porous structure.

Keywords: porous plastic packing, experimental setup, retention capacity, prediction.

В настоящее время значительный интерес проявляется к контактными устройствам для тепло- и массообменных аппаратов: насадочным [1–3] и тарельчатым [4–6], полностью или частично изготовленным из пористых полимерных

материалов – поропластов, пористых резин (пенорезин) и др.

Насадочные аппараты представляют собой наиболее распространенный тип химической аппаратуры.

В связи с тем, что поропластовые насадки обладают большой удельной поверхностью почти без ухудшения иных эксплуатационных характеристик, т. е. способствуют увеличению поверхности контакта фаз, область их практического применения включает в себя процессы очистки природного и попутного газа, осушки и очистки сжатого воздуха, отделения жидкости из газового потока, тепло- и массообменные процессы, а также биореакционные процессы в химической промышленности [2].

Необходимо отметить, что изготовление поропластовых насадок не представляет технологических трудностей, при этом по своим эксплуатационным свойствам они не уступают насадкам из других материалов: керамики, металла и др.

Так, например, изменяя состав резиновых смесей при введении в них различных каучуков и термопластичных материалов, можно добиться получения пористых резин с хорошими низкотемпературными свойствами, а также пенорезин, стойких к действию алифатических масел, нефти, серной кислоте, щелочи, аммиачной селитре, с высокой свето-, озono- и атмосферостойкостью, не поддерживающих горения и обладающих хорошим сопротивлением к тепловому старению, предназначенных для работы при температуре от $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+100\text{ }^{\circ}\text{C}$. Также возможно получение пористых резин, предназначенных для работы под воздействием горячего масла при температуре $150\div 200\text{ }^{\circ}\text{C}$ и обладающих высокой износостойкостью [1].

Значительное влияние на гидродинамический режим работы насадочных тепло- и массообменных аппаратов оказывает удерживающая способность насадки, иначе называемая количеством удерживаемой жидкости (КУЖ), которое складывается из статической и динамической составляющих. Статическая составляющая КУЖ представляет собой количество жидкости, удерживаемое насадкой за счет действия капиллярных сил, и не зависит от гидродинамической обстановки в аппарате. Динамическая составляющая КУЖ представляет собой количество движущейся через насадку жидкости, определяемое гидродинамическими условиями работы аппарата [7].

Удерживающая способность определяется экспериментально и в основном зависит от основных характеристик насадки – порозности

и удельной поверхности. С уменьшением удерживающей способности снижается гидравлическое сопротивление орошаемой насадки и расширяется устойчивый диапазон турбулентного гидродинамического режима работы насадочного аппарата вплоть до достижения инверсии фаз. Однако при этом уменьшается величина поверхности тепло- и массопередачи, что при прочих равных условиях негативно отражается на интенсивности протекания тепло- и массообменных процессов в насадочных аппаратах.

В работе [1] показано, что степень увеличения гидравлического сопротивления орошаемой поропластовой насадки падает с увеличением фиктивной скорости газа из-за влияния ее внутренней порозности, зависящей от физических свойств рабочих сред.

В связи с этим экспериментальное определение удерживающей способности поропластовых насадок, имеющих высокоразвитую внутреннюю пористую структуру, является актуальным и представляет собой цель настоящей работы.

Исследования удерживающей способности поропластовых насадок проводились на экспериментальной установке, схема которой представлена на рис. 1.

Установка состоит из стеклянной колонны 1, прямоугольной формы поперечным сечением $125\times 125\text{ мм}$. Орошение насадки осуществлялось сверху через распределитель 8 водой, подаваемой по трубопроводу 7. Расход воды регулировался вентилем 3 и контролировался электрическим дистанционным ротаметром 5, показания которого фиксировались потенциометром 6. Температура воды контролировалась термометром 14. Снизу через насадку продувался воздух, нагнетаемый в колонну с помощью вентилятора 11. Расход воздуха изменялся путем регулирования числа оборотов электродвигателя вентилятора с помощью лабораторного автотрансформатора 10 и контролировался по ротаметру 9. Прошедшая через насадку вода отводилась из колонны по трубопроводу 13. Для предотвращения выхода воздуха из колонны по трубопроводу 13 ее нижняя часть заполнялась водой, уровень которой контролировался по стеклянной водомерной трубке 4. Расход жидкости, вытекающей из колонны по трубопроводу 13, регулировался с помощью вентиля 2. Колонна 1 имела возможность закрепления на весах 15.

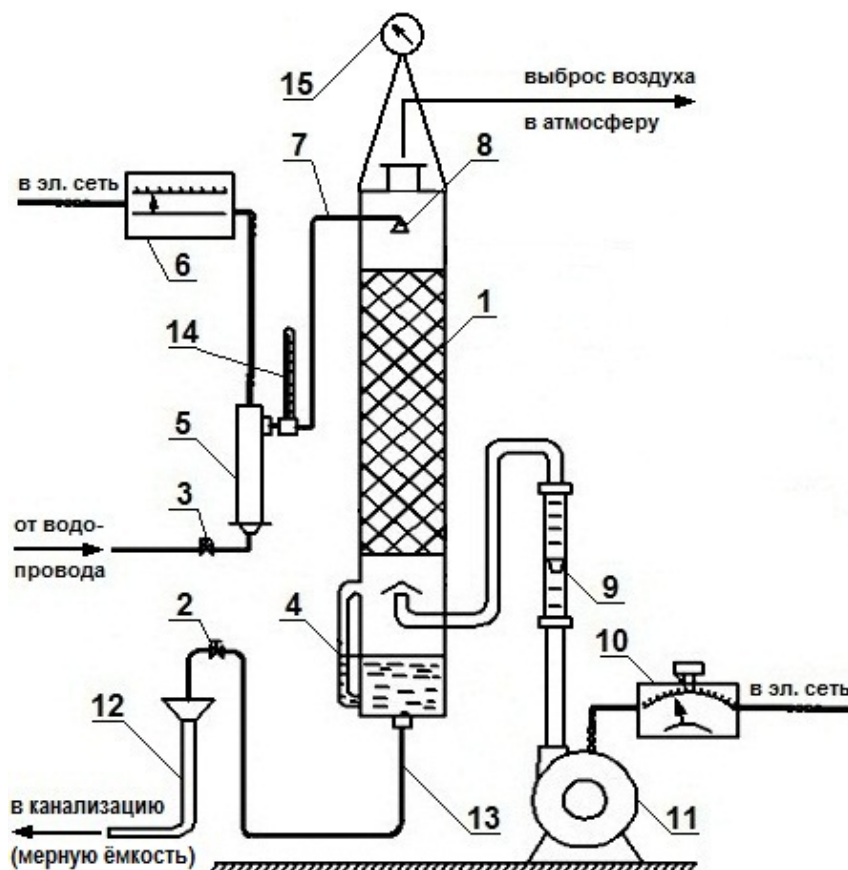


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:

1 – колонна; 2, 3 – вентили; 4 – стеклянная водомерная трубка; 5 – ротаметр РЭД; 6 – потенциометр; 7, 13 – трубопровод для воды; 8 – распределитель жидкости; 9 – ротаметр стеклянный; 10 – лабораторный автотрансформатор; 11 – вентилятор; 12 – отвод в канализацию (мерную ёмкость); 14 – термометр; 15 – весы

В качестве насадки использовались поропластовые кольца Рашига размером $10 \times 10 \times 2$ мм, для которых согласно методике [2] были определены основные характеристики с учетом наличия высокоразвитой внутренней пористой структуры: порозность $\varepsilon = 0,751 \text{ м}^3/\text{м}^3$; удельная поверхность $\sigma = 927 \text{ м}^2/\text{м}^3$; эквивалентный диаметр $d_s = 3,24 \cdot 10^{-3} \text{ м}$. Насадка загружалась «внавал» на опорную решетку, выполненную из металлической сетки с размерами ячейки 1×1 мм. Высота насадки составляла 400 мм.

Исследования проводились на системе вода–воздух в диапазоне фиктивных скоростей воздуха $w_z = 0,15 \div 0,58 \text{ м/с}$ при плотностях орошения $U = 8 \div 16 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{час})$.

Удерживающая способность поропластовых насадок определялась двумя методами. Статическая составляющая КУЖ определялась по методу отсечки орошения, согласно которому резко прекращают подачу орошения и измеряют количество жидкости, вытекающей из колонны после прекращения орошения. Динамическая составляющая КУЖ определялась по методу

взвешивания, который позволяет фиксировать массу колонны как при отсутствии орошения, так и при любой плотности орошения [7].

В табл. 1 представлены экспериментальные данные по определению удерживающей способности поропластовых колец Рашига размером $10 \times 10 \times 2$ мм.

В результате математической обработки опытных данных получено уравнение для определения КУЖ $\delta = f(Re_{жс}, Re_z)$ для поропластовых колец Рашига размером $10 \times 10 \times 2$ мм:

$$\delta = 5,067 \cdot 10^{-2} \cdot Re_{жс}^{0,420} \cdot Re_z^{0,005}, \quad (1)$$

где $Re_{жс} = \frac{4 \cdot w_{жс} \cdot \rho_{жс}}{\sigma \cdot \mu_{жс}}$ – число подобия Рейнольдса для потока жидкости: $w_{жс}$ – фиктивная скорость жидкости, м/с; $\rho_{жс}$ – плотность жидкости, кг/м³; $\mu_{жс}$ – вязкость жидкости, Па·с;

$Re_z = \frac{4 \cdot w_z \cdot \rho_z}{\sigma \cdot \mu_z}$ – число подобия Рейнольдса для потока газа: w_z – фиктивная скорость газа, м/с; ρ_z – плотность газа, кг/м³; μ_z – вязкость газа, Па·с.

Таблица 1

Экспериментальные данные по определению удерживающей способности поропластовых колец Рашига размером $10 \times 10 \times 2$ мм

№ п/п	Объём статически задержанной жидкости	Статическая составляющая КУЖ	Массовый расход жидкости	Фиктивная скорость жидкости	Число подобия Рейнольдса для потока жидкости	Массовый расход газа	Фиктивная скорость газа	Число подобия Рейнольдса для потока газа	Объём динамически задержанной жидкости	Динамическая составляющая КУЖ	Экспериментальное значение КУЖ	Теоретическое значение КУЖ, рассчитанное по уравнению (1)
–	$V_{ст}$	$\delta_{ст}$	L	$w_{жс}$	$Re_{жс}$	G	w_g	Re_g	$V_{дин}$	$\delta_{дин}$	$\delta^э$	$\delta^м$
–	м ³	м ³ /м ³	м ³ /с	м/с	–	м ³ /с	м/с	–	м ³	м ³ /м ³	м ³ /м ³	м ³ /м ³
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	$3,68 \cdot 10^{-4}$	0,059	$3,77 \cdot 10^{-5}$	$2,41 \cdot 10^{-3}$	9,14	$2,36 \cdot 10^{-3}$	0,151	42,62	$4,49 \cdot 10^{-4}$	0,072	0,131	0,131
2						$4,72 \cdot 10^{-3}$	0,302	85,23	$4,51 \cdot 10^{-4}$	0,072	0,131	0,131
3						$9,01 \cdot 10^{-3}$	0,576	162,71	$4,53 \cdot 10^{-4}$	0,072	0,131	0,132
4			$6,75 \cdot 10^{-5}$	$4,32 \cdot 10^{-3}$	16,35	$2,36 \cdot 10^{-3}$	0,151	42,62	$6,73 \cdot 10^{-4}$	0,108	0,167	0,167
5						$4,72 \cdot 10^{-3}$	0,302	85,23	$6,75 \cdot 10^{-4}$	0,108	0,167	0,167
6						$9,01 \cdot 10^{-3}$	0,576	162,71	$6,86 \cdot 10^{-4}$	0,110	0,169	0,168

Значения чисел подобия Рейнольдса в экспериментах лежали в диапазонах: для потока жидкости $Re_{жс} = 9 \div 16$, для потока газа $Re_g = 40 \div 160$. Средняя относительная ошибка полученного уравнения не превышает 0,3 %, а коэффициент линейной множественной корреляции равен 0,999.

В силу малости значения показателя степени при Re_g в уравнении (1) была проведена проверка значимости этого коэффициента регрессии по критерию Стьюдента. На основании того, что расчетное значение критерия Стьюдента составило 6,09 против табличного 2,18 был сделан вывод о его значимости и о необходимости его наличия в уравнении (1).

В табл. 1 приведено сравнение экспериментальных значений КУЖ с теоретическими, полученными в результате расчета по уравнению (1).

Представляет интерес сравнение полученных опытных данных по удерживающей способности поропластовой насадки с расчетными по рекомендуемым в литературе уравнениям Отаке [7]:

$$\delta_{ст} = \frac{0,00038}{d}, \quad (2)$$

$$\delta_{дин} = 41,8 \cdot Re_d^{0,5} \cdot Ga_d^{-0,5}, \quad (3)$$

где $Re_d = w_{жс} \cdot d \cdot \rho_{жс} / \mu_{жс}$ – число подобия Рейнольдса для потока жидкости, отнесенное к номинальному диаметру насадочных тел d (для колец Рашига размером $10 \times 10 \times 2$ мм $d = 0,01$ м); $Ga_d = g \cdot d^3 \cdot \rho_{жс}^2 / \mu_{жс}^2$ – число подобия Галилея для потока жидкости, отнесенное к номинальному диаметру насадочных тел d .

Статическая составляющая КУЖ, рассчитанная по уравнению (2), равна $0,038$ м³/м³, что составляет около 65 % от реальной – $0,059$ м³/м³. Это обстоятельство говорит о том, что в действительности жидкость проникает в поры насадки при ее работе в насадочном аппарате.

Динамическая составляющая КУЖ, рассчитанная по уравнению (3), хорошо совпадает с экспериментальными данными табл. 1 (расхождение составляет в среднем около 10 %).

Таким образом, предложенное авторами уравнение (1) можно рекомендовать в качестве расчетной зависимости для точного прогнозирования удерживающей способности (КУЖ) поропластовых насадок при их работе в тепло- и массообменных насадочных аппаратах.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Поропластовые насадки для тепло- и массообменных процессов / А. Б. Голованчиков, А. А. Шагарова, П. С. Васильев, К. В. Черикова // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2017. – № 12. – С. 3–6.
2. *Васильев, П. С.* Метод расчета основных геометрических характеристик насадок из поропластовых материалов / П. С. Васильев, Л. С. Рева, А. А. Шагарова // Химическая технология. – 2019. – Т. 20, № 9. – С. 429–432.
3. П. м. № 131311 РФ, МПК В01J19/00. Насадка для массообменного аппарата / А. Б. Голованчиков, П. С. Васильев, Н. А. Дулькина, Т. Б. Агеева, В. В. Разуваев, В. Я. Закурский. – заявл. 04.02.2013; опубл. 20.08.2013.
4. П. м. № 135522 РФ, МПК В01D3/00. Массообменная тарелка / А. Б. Голованчиков, П. С. Васильев, С. Л. Рева, Л. С. Рева, А. С. Юдина, А. Е. Альменова. – заявл. 04.07.2013; опубл. 20.12.2013.
5. П. м. № 143613 РФ, МПК В01D3/22. Клапанная тарелка / П. С. Васильев, А. Б. Голованчиков, С. Л. Рева, Л. С. Рева, К. В. Черикова, А. А. Максимов. – заявл. 03.04.2014; опубл. 27.07.2014.
6. П. м. № 158005 РФ, МПК В01D3/00. Клапанная тарелка / П. С. Васильев, А. Б. Голованчиков, Л. С. Рева, С. Л. Рева, К. В. Черикова, В. Д. Железникова. – заявл. 12.01.2015; опубл. 20.12.2015.
7. *Рамм, В. М.* Абсорбция газов / В. М. Рамм. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва: Химия, 1976. – 656 с.

ТРАНСПОРТ

УДК 621.433.057

Е. А. Захаров, Э. Г. Сафаров, Е. А. Федянов

**ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ БАЛАНС СИСТЕМЫ
ТЕРМОХИМИЧЕСКОЙ РЕКУПЕРАЦИИ ТЕПЛОТЫ
АВТОМОБИЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ, РАБОТАЮЩЕГО НА ПРОПАНЕ***

Волгоградский государственный технический университет

e-mail: tig@vstu.ru

Проанализирован тепловой баланс системы генерации водородосодержащего синтез-газа из пропана за счет теплоты отработавших газов автомобильного двигателя. Приведены результаты замеров температуры отработавших газов на различных режимах работы двигателя. Расчетным путем определена доля пропана от общего его расхода в двигателе, которая может быть конвертирована в синтез-газ за счет теплоты, забираемой от отработавших газов в заданном интервале изменения их температуры.

Ключевые слова: синтез-газ, сжиженный углеводородный газ, рекуперация теплоты.

E. A. Zakharov, E. G. Safarov, E. A. Fedyanov

**ENERGY BALANCE OF THE THERMOCHEMICAL HEAT RECOVERY
SYSTEM OF A PROPANE FUELED AUTOMOTIVE ENGINE**

Volgograd State Technical University

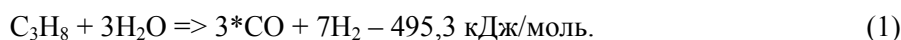
The thermal balance of the system for generating hydrogen-containing synth-tez gas from propane due to the heat of the exhaust gases of an automobile engine is analyzed. The results of measurements of the exhaust gas temperature at various operating modes of the engine are presented. The proportion of propane from its total consumption in the engine, which can be converted into synthesis gas due to the heat taken from the exhaust gases in a given range of changes in their temperature, is calculated.

Keywords: gas, liquefied petroleum gas, heat recovery.

Известно [1], что в двигателях внутреннего сгорания с искровым зажиганием без турбонаддува с отработавшими газами теряется до 35 % теплоты, выделяющейся при сгорании топлива. Среди способов, принципиально позволяющих снизить указанные потери, привлекает внимание термохимическая рекуперация (ТХР) теплоты отработавших газов, заключающаяся в использовании этой теплоты для преобразования части поступающего в двигатель углеводородного топлива в другой его вид с более высокой теплотой сгорания [2]. В основном рассматривается преобразование углеводородного

топлива в содержащий свободный водород синтез-газ. В ходе ряда относительно недавно выполненных исследований возможность уменьшения расхода топлива за счет ТХР была подтверждена на двигателях, работавших на бензине и природном газе (метане) [3–7].

В двигателях, работающих на пропане, конверсия пропана в синтез-газ может быть осуществлена путем последовательного проведения двух химических реакций. Первая из них – эндотермическая реакция парового риформинга пропана на никелевом катализаторе при 700–900 °С:



Вторая экзотермическая реакция водяного сдвига:



идет на медно-цинковом катализаторе при падающем температурном профиле 350–250 °С.

Одна из возможных схем системы термо-

химической рекуперации теплоты в ДВС с искровым зажиганием, работающем на пропане, представлена на рис. 1.

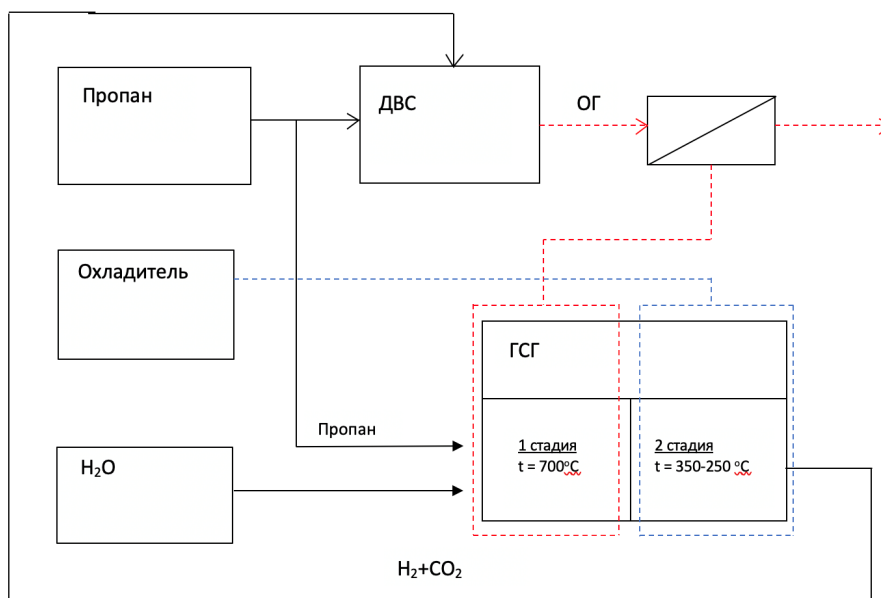


Рис. 1. Схема 2-х стадийной ТХР для двигателя с искровым зажиганием

На вход первой секции генератора синтез-газа подается от 1/20 до 1/10 массы пропана, поступающего непосредственно в двигатель. В эту же секцию генератора синтез-газа добавляется вода. Масса добавляемой воды в 9–12 раз превышает массу подаваемого в генератор пропана, то есть вода берется с избытком по сравнению со стехиометрическим соотношением для реакции (1). Теплота, необходимая для протекания реакции (1), подводится в генератор от отработавших газов двигателя.



Рис. 2. Место установки термопары

Для подтверждения возможности использования теплоты отработавших газов для получения синтез-газа на двигателях ВАЗ-11194 были проведены измерения температуры отработавших газов на выходе из головки цилиндров. Хромель-копелевая термопара была установлена в выпускном коллекторе двигателя в ветви второго цилиндра (рис. 2).

Результаты замеров температуры отработавших газов на 8 различных режимах работы двигателя представлены в табл. 1. Как видно, эта температура достаточна для проведения реакции (1) при использовании никелевого катализатора лишь на режимах работы двигателя с частотой вращения 2500 мин⁻¹ и выше и с мощностью, превышающей 50 % от мощности при полном открытии дроссельной заслонки. На остальных режимах работы ТХР можно осуществлять лишь при условии, что катализатор генератора обеспечивает протекание реакции (1) в интервале температур с нижней границей 500 °С.

Из приведенных в таблице режимов в минимальной степени удовлетворяет температурным условиям протекания реакции (1) режим с частотой вращения 2500 мин⁻¹ и эффективной мощностью 25,7 кВт.

Результаты замеров температур ОГ

Частота вращения коленчатого вала, мин ⁻¹	Мощность, кВт	Массовый расход воздуха, кг/ч	Температура, °С
2000	12,3	71,4	620
2000	20,5	104,6	650
2500	5,1	38,3	520
2500	15,4	84,2	670
2500	25,7	123,4	720
3000	6,2	53,5	600
3000	18,5	95,8	740
3000	30,8	146	740

Количество теплоты, которое на этом режиме можно отвести от отработавших газов в генераторе синтез-газа при условии, что их температуры на выходе из генератора равна 700 °С, найдем, исходя из расхода отработавших газов и их теплоемкости.

Расход отработавших газов складывается из расхода воздуха и расхода топлива. При расходе воздуха, указанном в таблице, расход пропана в

случае стехиометрической топливовоздушной смеси равен 0,002 кг/с, и расход отработавших газов составляет 0,0363 кг/с. Расчетный состав продуктов сгорания стехиометрической пропановоздушной смеси: 17,8 % CO₂ (по массе), 9,8 % H₂O и 72,4 % N₂. Используя для перечисленных компонентов линейные аппроксимации зависимостей их массовых теплоемкостей от температуры [8], получаем для продуктов сгорания

$$c_p \Big|_0^t = (1,082 + 1,381 \cdot 10^{-4} \cdot t), \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}. \quad (3)$$

Тепловой поток, отдавая который смесь указанного состава охлаждается от 720 до 700 °С, равен 0,93 кВт. Пересчитанный на единицу массы пропана тепловой эффект реакции (1) равен 11257 кДж/кг. Сопоставляя найденные значения теплового потока от продуктов сгорания и теплового эффекта реакции (1), приходим к выводу, что на рассматриваемом режиме можно за счет теплоты отходящих газов конвертировать в синтез-газ $8,26 \cdot 10^{-5}$ кг/с пропана. В относительном выражении это примерно 4,1 % от количества пропана, поступающего непосредственно в двигатель. В соответствии с законом сохранения массы такую же долю от поступающего в двигатель пропана будет составлять синтез-газ.

Согласно опытным данным [9], наибольший эффект от добавок синтез-газа, получаемого паровой конверсией пропана, наблюдается, когда величина добавки около 5 % от общей массы горючих компонентов в топливовоздушной смеси. Таким образом, можно заключить, что на рассматриваемом режиме температура отработавших газов после выпускных клапанов достаточна, чтобы генерировать синтез-газ в относительном количестве, близком к тому, при котором наблюдается наибольший эффект от добавок этого газа к основному топливу.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Двигатели внутреннего сгорания. Теория поршневых и комбинированных двигателей / Под ред. А. С. Орлина, М. Г. Круглова. – М.: Машиностроение, 1983.
2. Носач, В. Г. Методы повышения эффективности использования топлива в технологических процессах / В. Г. Носач // Теплофизика и теплотехника. – 1967. – № 7. – С. 44.
3. Ипатов, А. А. Разработка и исследования транспортных средств с различными типами водородных и комбинированных энергоустановок / А. А. Ипатов, В. Ф. Каменев, Н. А. Хрипач, Л. Ю. Лежнев // Журн. автотомоб. инженеров. – 2007. – № 5 (46). – С. 18.
4. Фомин, В. М. Автомобильный двигатель, работающий на смесевом топливе бензин-водород / В. М. Фомин, В. Ф. Каменев, Н. А. Хрипач // АГЗК + Альтернативные топлива. – 2006. – № 1. – С. 72–77.
5. Разработка компактных устройств для получения синтез-газа из углеводородного топлива на борту автомобиля в целях повышения топливной экономичности и улучшения экологических характеристик автомобилей / О. Ф. Бризицкий, В. Я. Терентьев, А. П. Христолюбов и др. // Альтернативная энергетика и экология. – 2004. – № 11. – С. 17–23.
6. Перспективы использования газобаллонных автомобилей с бортовым генератором синтез-газа / Н. Г. Певнев, В. А. Кириллов, О. Ф. Бризицкий, В. А. Бурцев // Транспорт на альтернативном топливе. – 2010. – № 3 (15). – С. 40–45.
7. Синтез-газ – новое альтернативное топливо для транспортных двигателей / Хрипач Н. А. // АГЗК + Альтернативное топливо. – 2003. – № 5. – С. 54–56.
8. Нащокин, В. В. Техническая термодинамика и теплопередача / В. В. Нащокин. – М.: Высш. школа, 2003. – 469 с.
9. Алимов, В. А. Влияние добавок синтез-газа к пропан-бутану на процесс сгорания в автомобильном двигателе / В. А. Алимов, Е. А. Захаров, Э. Г. Сафаров, Е. А. Федянов // Двигателестроение. – 2020. – № 3 – С. 17–20.

УДК 629.7.036.3-253.5.004.15

*Д. И. Любченко, В. В. Быкадоров, А. А. Данилейченко***ПОВЫШЕНИЕ РЕМОНТОПРИГОДНОСТИ ЛОПАТОК
КОМПРЕССОРОВ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ,
ИМЕЮЩИХ ИЗНОС ВЫСОКОПРОЧНЫХ ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ****Луганский государственный университет им. Владимира Даля**
e-mail: vottako@rambler.ru.

Статья посвящена повышению износостойкости лопаток компрессора газотурбинного двигателя при одновременном соблюдении требований улучшения их ремонтпригодности. Предложения по комплексному повышению износостойкости и ремонтпригодности роторных и статорных лопаток основаны на современных методах и технологиях ионно-плазменного напыления покрытий, получивших в эксплуатации эрозионные повреждения как самого покрытия, так и пера лопаток.

Целями работы являлись проверка предложенных способов повышения эффективности эксплуатации газотурбинных двигателей при соблюдении требований снижения затрат на их восстановительный ремонт.

Использованы технические отчетные материалы и методы исследований предприятий промышленности и научных организаций по повышению надежности защиты компрессорных лопаток от эрозионных повреждений. Проверены на практике предлагаемые варианты ремонта лопаток с изношенными высокопрочными покрытиями на основе нитрида титана. Предложены новые физические модели для стандартного метода ремонта лопаток: взаимосвязь эффективности эксплуатации и всех видов простоя техники; защита входной кромки, спинки и корыта лопатки с учетом снижения затрат на ремонт и последующее нанесение высокопрочных защитных нанопокровов.

Подтверждена целесообразность распространения стандартного метода ремонта лопаток с остатками разнооттеночных покрытий без использования дополнительного специального технологического оборудования. Предложенный новый метод снижения затрат ремонта основан на различиях в цветовой гамме чередующихся слоев нанопокровов.

Полученные результаты могут быть использованы в процессе капитального ремонта газотурбинных двигателей наземного и авиационного использования.

Ключевые слова: газотурбинный двигатель, износостойкое защитное покрытие, компрессор, лопатка, нитрид титана, ремонт.

*D. I. Lyubchenko, V. V. Bykadorov, A. A. Danileychenko***IMPROVING THE MAINTAINABILITY OF COMPRESSOR BLADES
OF GAS TURBINE ENGINES
WITH WEAR OF HIGH-STRENGTH PROTECTIVE COATINGS****Lugansk Vladimir Dahl State University**

The article is devoted to increasing the wear resistance of the compressor blades of a gas turbine engine while meeting the requirements for improving their maintainability.

Proposals for a comprehensive increase in the wear resistance and maintainability of rotor and stator blades are based on modern methods and technologies of ion-plasma spraying of coatings that have received erosion damage in operation both of the coating itself and the blade airfoil.

The objectives of the work were to test the proposed methods to increase the efficiency of operation of gas turbine engines while meeting the requirements for reducing the cost of their overhaul.

Used technical reporting materials and research methods of industrial enterprises and scientific organizations to improve the reliability of protection of compressor blades from erosion damage.

The proposed repair options for blades with worn out high-strength coatings based on titanium nitride have been tested in practice.

New physical models for the standard method of repairing blades are proposed: the relationship between the efficiency of operation and all types of equipment downtime; protection of the leading edge, backrest and trough of the blade, taking into account the reduction in repair costs and the subsequent application of high-strength protective nanocoatings.

The expediency of spreading the standard method of repairing blades with remnants of variegated coatings without the use of additional special technological equipment has been confirmed.

The proposed new method for reducing repair costs is based on differences in the color spectrum of alternating nanocoating layers.

The obtained results can be used in the process of overhaul of gas turbine engines for ground and aviation applications.

Keywords: gas turbine engine, wear-resistant protective coating, compressor, blade, titanium nitride, overhaul.

Введение

Требования к безопасности полетов уславливают строгое соблюдение ресурсных ограничений для авиационной техники. Например, для лопаток компрессоров газотурбинных двигателей (ГТД) начальный межремонтный ресурс равен аналогичному ресурсу двигателя, но в процессе эксплуатации он уменьшается под действием ряда факторов, например, от эрозионного воздействия твердых частиц (песка, пыли и т. п.), содержащихся во всасываемом воздухе. В результате ГТД в тяжелых условиях эксплуатации не вырабатывают свой межремонтный ресурс и досрочно направляются в ремонт.

Для защиты компрессорных лопаток от износа применяются пылезащитные устройства и высокопрочные противозерозионные защитные нанопокрyтия, замедляющие эрозионный износ пера лопаток. Нанесенные в процессе ремонта компрессорных лопаток ионно-плазменным методом высокопрочные нанопокрyтия, воспринимая на себя абразивный износ, увеличивают выработку межремонтного ресурса. Однако ввиду своей высокой микротвердости до 50 ГПа и упругости около 300 ГПа, в процессе ремонта они трудно удалимы.

Постановка задачи (цели работы)

Задачами представленной в данной статье работы являлись анализ и проверка предложенных методов повышения эффективности эксплуатации и серийного ремонта компрессорных лопаток ГТД при одновременном соблюдении требований снижения производственных затрат на восстановление их технического состояния. Для этого авторами исследованы передовые научные разработки и последние достижения в области нанесения и ремонта высокопрочных защитных нанопокрyтий на основе нитрид титана.

В рамках своей работы авторами использована установка ионно-плазменного напыления в вакууме «Булат-6». Наносилось по два слоя нитрид титанового и циркониевого нитрид титанового покрyтий толщиной 5–6 мкм на лопатки компрессора газотурбинного двигателя ТВЗ-117, материал основы ВТ-8. Замер производился с помощью вихретокового толщиномера «Константа К5». Микровердость контролировалась прибором ПМТ-3.

Под давлением $0,32 \pm 0,02$ МПа электрокорундовым песком 14А F60 (дисперсность от

100 до 300 мкм) проведена пескоструйная обдувка полученных нанопокрyтий, что, согласно [1, 2], имитирует повышенную запыленность воздуха. Скорость уноса материала контролировалась на весах с точностью 1 мг. На рис. 1 представлен внешний вид лопаток в процессе обдувки (левый снимок) и после полного удаления покрyтий (правый снимок).

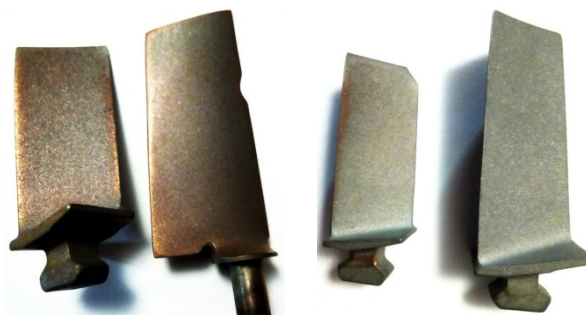


Рис. 1. Обработка лопаток компрессора газотурбинного двигателя

Дополнительно проведены и проанализированы работы по удалению остатков изношенного покрyтия на лопатках с эксплуатационным износом по методам [3–6], где предлагаются импульсный электроэрозионный и гальванический методы снятия покрyтия. В [7] предлагается станочная обработка лопаток шлифовальным кругом, «опирающимся» на границу износа высокопрочного покрyтия.

Установлено, указанные методы не в полной мере учитывают размеры и количество лопаток в ГТД, не имеющих четких границ приграничных слоев изношенного нитрид титанового покрyтия (рис. 2). В результате применение таких методов в серийном ремонте проблематично.

На снимке (рис. 2, а) представлены лопатки последней и первой ступеней компрессора со стандартным эрозионным износом защитного слоя. Два снимка (рис. 2, б) – виды зон износа приграничной и граничной зон (увеличение $\times 100$). Установлено, в граничном и приграничном зонах эрозия защитного покрyтия протекает одинаково – очагово и неравномерно. Поэтому травление остатков нанопокрyтия происходит одновременно с подтравливанием основного материала лопатки, что недопустимо. На снимке (рис. 2, в) ($\times 100$) представлено неудовлетворительное состояние поверхности лопатки после травления.

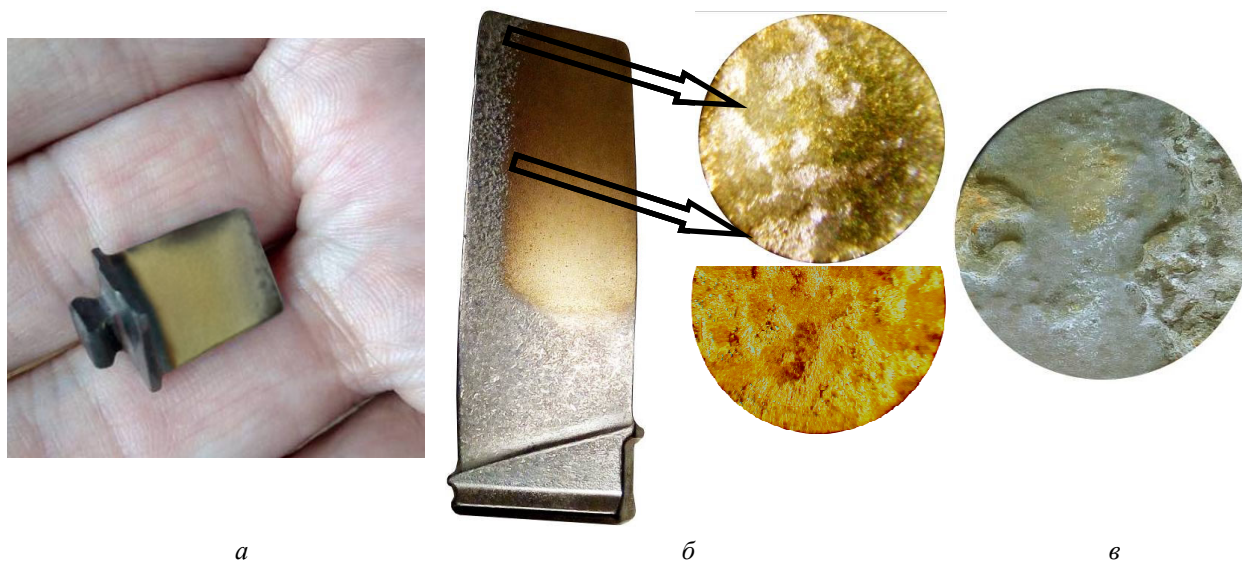


Рис. 2. Лопатки компрессора ГТД ТВ3-115 и результаты их исследований

Лопатки на рис. 2 имеют естественный эрозионный износ высокопрочного защитного покрытия. Переходные зоны износа не позволяют произвести качественное изолирование оголенного металла для недопущения его растравливания или станочную обработку методом «опорного шлифования».

Результаты исследования

Проверенный на промышленном производстве авторами работы комплекс мероприятий по [3–7] не учитывает особенностей серийного ремонтного производства. Так, в [3–6] невозможен оперативный контроль гальванического снятия неравномерных остатков покрытий. В [7] автоматизированная обработка пера лопатки ведет к его недопустимому местному утонению. Все это приводит к появлению брака после таких методов ремонта.

Для снижения затрат ремонта и уменьшения возможного брака по [3–7] авторами работы исследована возможность частичного удаления с различной степенью износа одного и двух (нитрид титана + циркониевый нитрид титана) покрытий на лопатах, материал ВТ-8, по стандартной технологии без использования дополнительного специального технологического оборудования.

Установлено, в серийном ремонте при последующем нанесении нового покрытия целесообразно сохранение метода ручной шлифовки (рис. 3, а). Пережог краев лопатки возможен (рис. 3, б), однако остатки контрастных по цвету слоев многослойных обрабатываемых покрытий (рис. 3, в) позволяют оперативно изменять усилия прижатия лопатки к обрабатывающему круг и существенно уменьшать производственный брак.



Рис. 3. Обработка лопаток в процессе их ремонта

В результате исполнитель работ получает возможность визуально и своевременно контролировать обработку нескольких разноотечных нанослоев и своевременно переходить от их шлифовки к полировке, чем одновременно устраняется брак, и подготавливается лопатка к 9–10-му классу чистоты поверхности для нанесения нового покрытия.

Обсуждение и заключения

При серийном ремонте снятие покрытий по [3–6] методами гальвано- или станочной обработки трудноосуществимо. Увеличиваются на 11 % трудозатраты ремонта (при условии отсутствия брака после таких методов ремонта). По [7] требуется закупка дорогостоящего специального оборудования и программного обеспечения, что проблематично для большинства ремонтных предприятий.

По результатам проведенных исследований авторы считают целесообразным:

1) исключение необходимости полного снятия изношенных высокопрочных нанопокрытий в процессе ремонта компрессорных лопаток ГТД;

2) сохранение ручной шлифовки и полировки лопаток с оперативным контролем остатков нескольких визуально различимых по цвету слоев покрытий.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Хворостухин, Л. А.* Исследование эрозионной прочности ионно-плазменного покрытия из нитрида титана / Л. А. Хворостухин, Ю. А. Ножницкий, А. Е. Болманенков // *Авиац. пром-сть*. – 1988. – № 6. – С. 59–61.
2. *Виноградов, В. Н.* Абразивное изнашивание. – М.: Машиностроение, 1990. – 224 с. – С. 170–181.
3. *Тарасенко, Ю. П.* Ремонтно-восстановительная технология с применением плазменных покрытий для лопаток газотурбинных двигателей газоперекачивающих агрегатов / Ю. П. Тарасенко, И. Н. Царева, О. Б. Бердник, Я. А. Фель // 10-я Междунар. науч.-практич. конф. «Технологии ремонта, восстановления и упрочнения деталей машин, механизмов, оборудования, инструмента и технологической оснастки». – СПб. – 2008. Ч. 1. – С. 542–551.
4. Пат. 2087591 Российская Федерация. Раствор для удаления покрытия из нитрида титана / Остапов О. В., Хазанская И. И. – Режим доступа: URL: <http://www.findpatent.ru/patent/208/2087591.html>.
5. Пат. 2471017 Российская Федерация. Раствор для удаления покрытия из нитрида титана / Быбин А. А., Невьянцева Р. Р., Парфенов Е. В. – Режим доступа: URL: <http://allpatents.ru/patent/2471017.html>.
6. Пат. 2081207 Российская Федерация. Раствор для удаления покрытия из нитрида титана / Амирханова Н. А., Невьянцева Р. Р., Тимергазина Т. М. – Режим доступа: URL: <http://www.findpatent.ru/patent/208/2081207.html>.
7. *Михайлов, А. Н.* Особенности восстановления лопаток ГТД с эрозионно-коррозионными разрушениями вакуумных ионно-плазменных покрытий / А. Н. Михайлов, Д. А. Михайлов, А. П. Недашковский // *Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Междунар. сб. науч. раб.* – Донецк: ДонНТУ. – 2014. – № 1. – С. 159–163.

УДК 629.366

В. В. Косенко, Е. А. Федянов, А. И. Искалиев

АНАЛИЗ ИЗМЕНЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КОЛЕСНОГО СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО ТРАКТОРА ПРИ ПЕРЕОБОРУДОВАНИИ НА ГУСЕНИЧНЫЙ ХОД

Волгоградский государственный технический университет
e-mail: ts@vstu.ru

На примере трактора ХТЗ-150К-09 выполнен тяговый расчет и анализ тягово-скоростных и топливно-экономических показателей при его работе на штатном колесном движителе и сменном 4-гусеничном ходу на двух характерных сельскохозяйственных почвенных фонах: стерне и поле, подготовленном к посеву. Определены границы выгодной работы трактора ХТЗ-150К-09 на каждом из движителей.

Ключевые слова: сельскохозяйственный трактор, колесный движитель, гусеничный движитель, тяговый КПД, крутяковая мощность, тяговое усилие, скорость, расход топлива.

V. V. Kosenko, E. A. Fedyanov, A. I. Iskaliev

ANALYSIS OF CHANGES OF OPERATIONAL INDICATORS OF WHEELED AGRICULTURAL TRACTOR DURING IT'S CONVERSION INTO TRACKED

Volgograd State Technical University

Based on the calculations the analysis of traction, speed, fuel and economic indicators and average soil pressures was made when the HTZ-150K-09 tractor was running on a regular wheel drive and on a removable 4-track running on 2 agricultural soil backgrounds: stubble and a field prepared for sowing. The limits of profitable operation of the HTZ-150K-09 on each of the engines are determined.

Keywords: agricultural tractor, wheeled engine, track engine, traction coefficient of efficiency, hook power, traction, skidding, speed, fuel consumption.

Введение и постановка задачи

В сельскохозяйственном производстве, особенно в странах, расположенных в зонах рискованного земледелия, в качестве мобильных энергосредств наряду с колесными используются и гусеничные тракторы. Это обусловлено их лучшими сцепными качествами, лучшей проходимостью, более высоким тяговым КПД и меньшим вредным воздействием на почву. Например, для нашей страны оптимальная доля гусеничных сельскохозяйственных тракторов в парке оценивается в 35–40 %, а высоких тяговых классов 5–8 – даже в 45 % [1].

В последние годы и в странах с благоприятным климатом на полевых работах стали шире применять гусеничные тракторы, а многие тракторостроительные фирмы начали их производство, причем, как 2-гусеничных оригинальной конструкции (Caterpillar-AGCO, John Deere), так и 4-гусеничных на базе колесных (Case-IH, John Deere, CLAAS, New Holland, Deutz-Fahr и др.) [2].

В дальнейшем некоторые фирмы (Poluzzi, Sousy, Tidue) разработали и начали производить сменный гусеничный ход, который можно устанавливать на колесные тракторы. В частности, итальянская фирма Poluzzi предлагает широкую номенклатуру тележек с треугольным гусеничным обводом, которые в различных сочетаниях можно устанавливать на колесные тракторы формул 4x4a и 4x4b. При этом называются такие преимущества 4-гусеничного хода по сравнению с колесным, как меньшие уплот-

нение почвы и буксование, увеличенное сцепление, большее тяговое усилие, лучшая проходимость и экономия топлива (сохранена редакция рекламного проспекта фирмы).

Разработку и испытания сменных 4-гусеничных ходов на своих тракторах ведут и российские заводы: Санкт-Петербургский тракторный и «Ростсельмаш», а также Минский и Харьковский тракторные. В связи с этим представляется целесообразным проанализировать эксплуатационные, в том числе топливно-экономические, показатели трактора при замене колесного движителя на сменный 4-гусеничный.

Методика проведения исследований

Расчетный анализ выполнен на примере распространенного в сельскохозяйственном производстве России колесного тягового класса 3–4 трактора с шарнирной рамой ХТЗ-150К-09. Его штатный движитель – колеса с шинами 21,3R24. В качестве сменного использован гусеничный ход фирмы Poluzzi, состоящий из 4 тележек CTR 0030 с треугольным обводом (рис. 1). Каждая из тележек включает раму с закрепленными на ней ведущим колесом и 4 опорными катками, крайние из них – большего диаметра. Ведущее колесо и опорные катки охватывает ленточная резиноармированная гусеница (РАГ) с активным зацеплением с ведущим колесом. Один из крайних опорных катков тележки снабжен механизмом натяжения гусеницы.

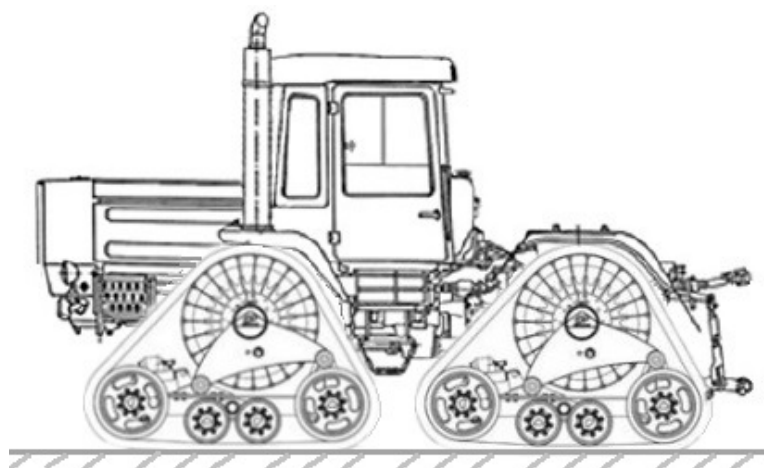


Рис. 1. Трактор ХТЗ-150К-09 на сменном 4-гусеничном ходу фирмы Poluzzi

Необходимые для расчетов технические характеристики трактора приняты по заводским материалам [3, 4], гусеничных тележек CTR 0030 –

из информационных материалов фирмы Poluzzi и приведены в табл. 1; скоростная характеристика дизеля ЯМЗ-236Д трактора – на рис. 2.

Для целей анализа был выполнен тяговый расчет трактора на обоих движителях с определением зависимости крюковой мощности $N_{кр}$, действительной скорости V , удельного крюкового расхода топлива $g_{кр}$, тягового КПД η_m от развиваемой трактором силы тяги на крюке $P_{кр}$ [5] на 2 характерных почвенных фонах: стерне (на 8 передачах основного диапазона) и поле, подготовленном к посеву (на первых 6 передачах этого диапазона; на двух высших сила сопротивления качению P_f превышает касатель-

ную силу тяги P_k). Кривые буксования для расчета перестроены с безразмерных [6]. При этом для трактора на сменном 4-гусеничном ходу по опыту исследований Волгоградского тракторного завода (ВГТЗ), показавших, что РАГ при прочих равных условиях буксуют меньше пневматических шин, но больше металлических гусениц, как среднее арифметическое между кривыми буксования колесного полноприводного и гусеничного на металлических гусеницах тракторов.

Таблица 1

Принятые в тяговом расчете технические характеристики трактора ХТЗ-150К-09

Характеристики	Трактор ХТЗ-150К-09	
	на колесах	на сменном 4-гусеничном ходу
Эксплуатационная масса, кг	8410	11342
Распределение массы по мостам, %, в статике: на передний/на задний	62/38	59/41
Эксплуатационная мощность дизеля ЯМЗ-236Д, кВт	130 при 2100 мин ⁻¹	
Максимальный крутящий момент дизеля, Нм	667 при 1335 мин ⁻¹	
Номинальный удельный расход топлива, г/кВт·ч	220	
Число передач переднего хода	16 (8 осн. + 8 пониженных)	
Передаточные числа основного диапазона трансмиссии	59,4; 50,3; 44,3; 37,9; 27,7; 23,4; 20,6; 17,6	
Теоретические скорости переднего хода, км/ч	3,4–30,1	3,3–22,9
Расчетный механический КПД трансмиссии	0,936	0,885(с учетом РАГ)
База, мм	2860	2860
Шины, обозначение	21,3R24	—
Ширина гусениц, мм	—	762
Радиус ведущих колес, мм	749	570
Принятый коэффициент сопротивления качению:		
– на стерне	0,09	0,08
– на поле, подготовленном к посеву	0,17	0,11

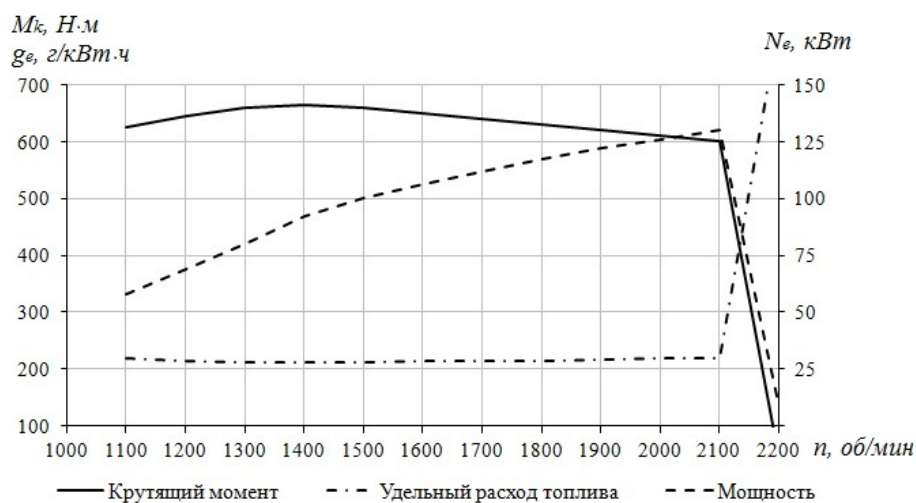


Рис. 2. Скоростная характеристика дизеля ЯМЗ-236Д трактора ХТЗ-150К-09

Результаты работы и их обсуждение

Расчеты и анализ полученных тяговых характеристик (рис. 3, 4) показал, что установка 4-гусеничного хода Poluzzi CTR 0030 на трактор ХТЗ-150К-09 вместо штатных колес с шинами 21,3R24 приводит к увеличению его эксплуатационной массы на 35 %: с 8410 до 11342 кг. На стерне это вызывает рост на 20 % силы сопротивления качению. На поле, подготовленном к посеву, наоборот, из-за меньшего коэффициента сопротивления качению гусеничного движителя потери на качение на нем на 15 % ниже, чем на колесах.

Несмотря на увеличение эксплуатационной массы, благодаря увеличению площади контакта гусениц, средние давления на почву на сменном 4-гусеничном ходу значительно ниже, чем на колесном: 25,13 кПа против 142,77 под передними и 19,88 кПа против 118,06 под задними движителями при работе с наиболее вероятной крюковой нагрузкой в 24 кН. Меньшие средние (и максимальные) давления на почву в сочетании с меньшим буксованием трактора на 4-гусеничном ходу будут снижать вредное воздействие на почву с точки зрения как ее уплотнения, так и нарушения благоприятной для произрастания сельскохозяйственных культур мелкокомковатой структуры (истирания). Также на сменном 4-гусеничном ходу увеличится проходимость трактора на слабонесущих фонах.

Из-за меньшего радиуса ведущих колес скорости движения трактора ХТЗ-150К-09 на 4-гусеничном ходу ниже, чем на колесах: на 10–31 % на стерне и на 23–33 % на поле, подготовленном к посеву (меньшие значения – при большей тяге); но, благодаря рациональному набору передач в трансмиссии (знаменатель геометрической ряда передаточных чисел внутри диапазона равен всего 1,13–1,18), это не скажется на выборе нужных скоростей при выполнении полевых работ.

Увеличение эксплуатационной массы и изменение гусеничного движителя приводят к существенному росту тяговых показателей. Если на колесном ходу номинальная сила тяги (сила тяги при максимальной крюковой мощности) трактора ХТЗ-150К-09 на стерне составляет 30,24 кН на II передаче при скорости 10,62 км/ч, буксовании 10 % и крюковой мощности 87,9 кВт, то на сменном 4-гусеничном ходу – 46,44 кН на I передаче при скорости 6,2 км/ч, буксовании 6,2 % и крюковой мощности 90,6 кВт; тяговый КПД при этом возрастает с 0,676 до 0,697. Таким образом, по ГОСТ 27021-86 согласно вы-

полненному расчету трактор ХТЗ-150К-09 на колесном движителе относится к тяговому классу 3, а на 4-гусеничном ходу – к тяговому классу 4. Максимальный тяговый КПД трактора на колесах равен 0,680 при тяге 27,60 кН; на гусеничном ходу – 0,700 (на 3 % выше) при тяге 52,61 кН.

На поле, подготовленном к посеву, изменение показателей при максимальной крюковой мощности, по сравнению с колесным на 4-гусеничном ходу, еще заметнее: сила тяги на крюке 30,45 и 43,10 кН; скорость (на I передаче) 8,34 и 6,77 км/ч; буксование 16,4 и 10,7 %; крюковая мощность 69,68 и 80,02 кВт; тяговый КПД (это и максимальные его значения) 0,536 и 0,616 соответственно; как видно, на данном фоне рост максимального тягового КПД составляет уже 15 %.

На стерне тяговый КПД трактора на сменном 4-гусеничном ходу начинает превышать тяговый КПД на колесах при силе тяги на крюке более 33,5 кН, и ожидать выигрыша в производительности и расходе топлива на единицу выполненной работы (погектарном) можно при тягах, больше вышеуказанной. Например, при наиболее вероятной для трактора тягового класса 3 крюковой нагрузкой $P_{кр} = 24$ кН на колесном ходу трактор будет работать на II передаче со скоростью 11,14 км/ч с тяговым КПД 0,668 и крюковым расходом топлива 377 г/кВт·ч; а на 4-гусеничном ходу – на IV передаче со скоростью 11,64 км/ч (на 4,5 % выше) с тяговым КПД 0,629 и крюковым расходом топлива 366 г/кВт·ч. В табл. 2 приведены сравнительные эксплуатационные показатели трактора ХТЗ-150К-09 на колесном и сменном 4-гусеничном ходу при работе с номинальной крюковой нагрузкой в 30 кН (номинальная крюковая сила тяги для трактора тягового класса 3), а для трактора на 4-гусеничном ходу – еще и в 36 кН (исходя из того, что, если принять тяговое сопротивление 5-корпусного плуга ПЛН-5-35 – распространенного орудия для стерни – равным 30 кН, то тяговое сопротивление 6-корпусного плуга ПЛП-6-35 составит 36 кН), чтобы проверить возможность работы на гусеничном ходу с орудием большей ширины захвата. Относительная производительность принималась прямо пропорциональной скорости и ширине захвата орудия (агрегата); относительный расход топлива на единицу выполненной работы (погектарный) – как частное от деления часового расхода топлива дизелем на относительную производительность.

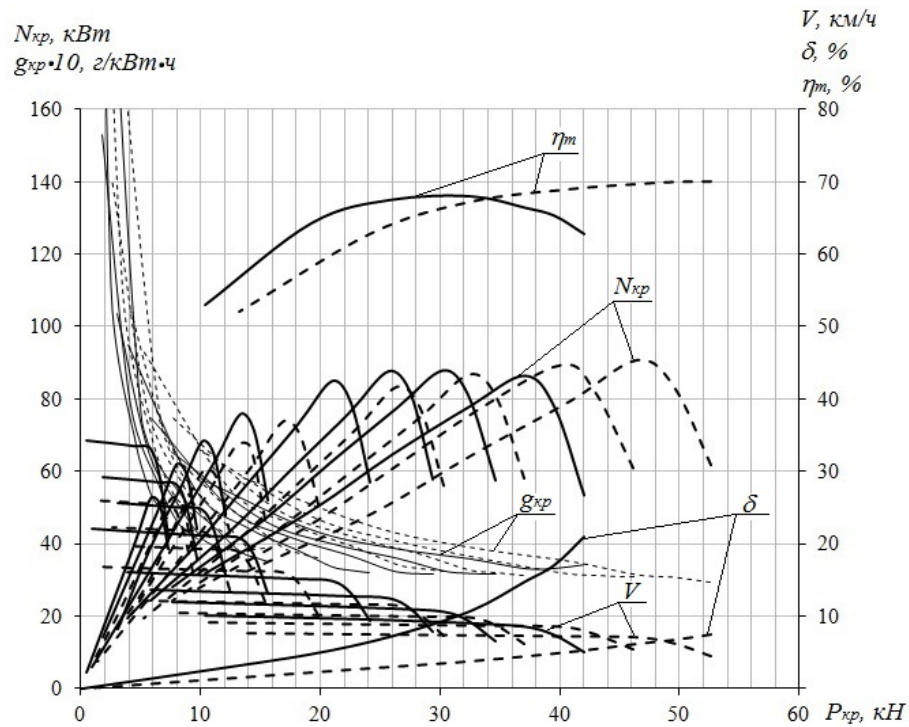


Рис. 3. Тяговая характеристика трактора ХТЗ-150К-09 на стерне
(сплошные линии – на колесном ходу, пунктирные – на сменном 4-гусеничном ходу)

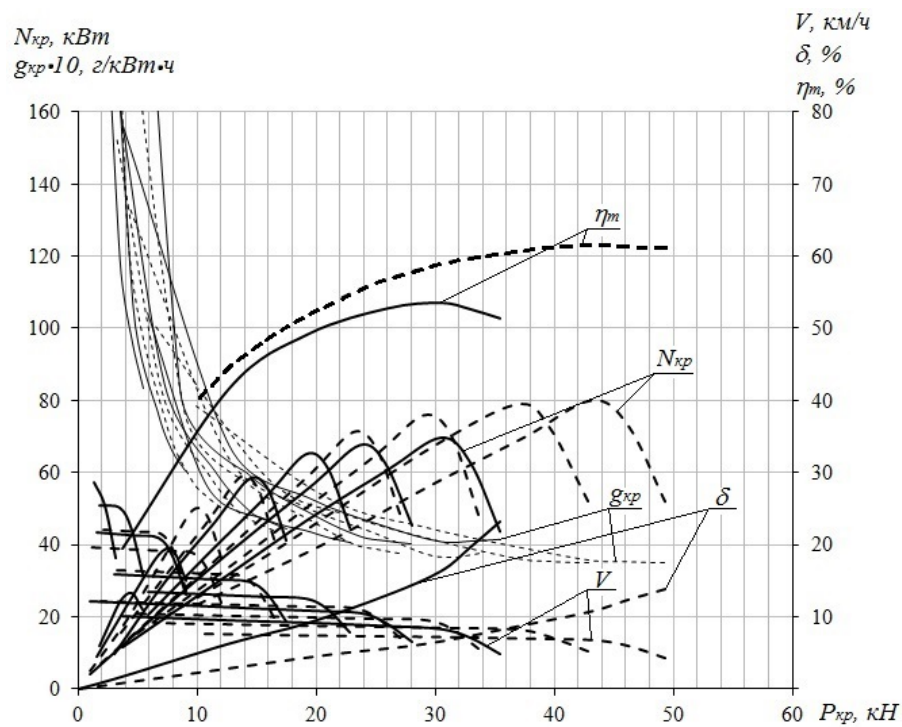


Рис. 4. Тяговая характеристика трактора ХТЗ-150К-09 на поле, подготовленном к посеву
(сплошные линии – на колесном, пунктирные – на сменном 4-гусеничном ходу)

Как следует из табл. 2, при работе на стерне с орудием большей ширины захвата прирост производительности на сменном 4-гусеничном

ходу выше, чем при работе с одинаковыми орудиями – 13 % против 8 %.

Таблица 2

**Сравнение эксплуатационных показателей трактора ХТЗ-150К-09
на колесном и сменном 4-гусеничном ходу при работе на стерне**

Характеристики	Трактор ХТЗ-150К-09		
	на колесах	на сменном 4-гусеничном ходу	
Сила тяги на крюке, кН	30	30	36
Передача	I	III	II
Скорость, км/ч	9,14	9,88	8,62
Буксование, %	9,3	3,5	4,4
Крюковая мощность, кВт	72,16	76,07	83,14
Тяговый КПД	0,681	0,659	0,679
Удельный крюковой расход топлива, г/кВтч	364	355	339
Относительная производительность, %	100	108	113
Относительный расход топлива на единицу выполненной работы, %	100	95	95

На поле, подготовленном к посеву, на 4-гусеничном ходу тяговый КПД выше, чем на колесах, при любых значениях тяги на крюке; при работе на этом почвенном фоне у трактора на 4-гусеничном движителе по сравнению с колесным, можно ожидать повышения производительности во всем диапазоне тяговых нагрузок. В табл. 3 приведены сравнительные эксплуатационные показатели трактора ХТЗ-150К-09 на колесном ходу при работе с крюковой нагрузкой в 24 кН и на 4-гусеничном ходу с крюковой нагрузкой в 24 и 32 кН (как и в предыдущем случае, исходя из того, что, если принять тяговое сопротивление агрегата из 3 сеялок типа СЗП-3,6 – распространенного агрегата для данного

фона – равным 24 кН, то тяговое сопротивление 4-сеялочного агрегата составит 36 кН).

Как следует из табл. 3, при работе на поле, подготовленном к посеву, как менее благоприятном для работы тяговых машин, прирост производительности на 4-гусеничном ходу по сравнению с работой на колесном движителе получается выше, чем на стерне и достигает 25 % при работе с агрегатом большей ширины захвата, экономия топлива при этом доходит до 9 %; увеличение погектарного расхода топлива при работе на 4-гусеничном ходу по сравнению с колесным при тяге в 24 кН объясняется работой дизеля трактора в данном конкретном случае с недогрузкой.

Таблица 3

**Сравнение эксплуатационных показателей трактора ХТЗ-150К-09
на колесном и сменном 4-гусеничном ходу при работе на поле, подготовленном к посеву**

Характеристики	Трактор ХТЗ-150К-09		
	на колесах	на сменном 4-гусеничном ходу	
Сила тяги на крюке, кН	24	24	32
Передача	I	III	II
Скорость, км/ч	8,93	9,73	8,37
Буксование, %	11,5	5,4	7,1
Крюковая мощность, кВт	50,29	64,04	68,69
Тяговый КПД	0,523	0,555	0,595
Удельный крюковой расход топлива, г/кВтч	471	426	393
Относительная производительность, %	100	109	125
Относительный расход топлива на единицу выполненной работы, %	100	106	91

Выводы

При замене на тракторе ХТЗ-150К-09 штатного колесного движителя на сменный 4-гусеничный (с тележками СТР 0030 фирмы Poluzzi):

1. Трактор будет оказывать меньшее вредное воздействие на почву, меньше уплотняя ее и меньше разрушая мелкокомковатую структуру, благодаря меньшим средним давлениям на

почву (несмотря на возросшую эксплуатационную массу) и меньшему буксованию;

2. Также, благодаря существенно меньшим средним давлениям на почву, увеличится проходимость трактора на почвах с малой несущей способностью;

3. Из-за меньшего радиуса ведущих колес снизятся скорости движения на тех же передачах, но при рациональном наборе передач в трансмиссии это не скажется на выборе нужных скоростей при выполнении полевых работ; снижение транспортных скоростей вряд ли можно считать критичным, так как на транспорте трактор наверняка рациональнее использовать на колесах;

4. Снижение буксования, благодаря гусеничному движителю и возросшей массе, приводит к росту тягового КПД; причем если на стерне максимальный тяговый КПД возрастает всего на 3 %: с 0,680 до 0,700, то на менее плотном поле, подготовленном к посеву, рост тягового КПД более существенен – 15 %: с 0,536 до 0,616;

5. Благодаря возросшей эксплуатационной массе, возрастут тяговые возможности трактора; он будет относиться к тяговому классу 4, в то время как на колесном движителе он отно-

сится к тяговому классу 3; учитывая, что тракторы этих классов комплектуются одинаковыми навесными, прицепными устройствами, трактор на 4-гусеничном ходу можно агрегатировать с орудиями большей ширины захвата и получить выигрыш в производительности до 25 %.

Применение для колесных тракторов сменного 4-гусеничного хода представляется перспективным направлением повышения их эксплуатационных показателей.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Липкович, Э. И. Трактор Т-250: жизнь и судьба / Э. И. Липкович // Тракторы и сельхозмашины. – 2012. – № 8. – С. 3–12.
2. Косенко, В. В. О необходимости использования гусеничных тракторов в сельском хозяйстве России / В. В. Косенко, Г. И. Носов // Техника и оборудование для села. – 2015. – № 2 (212). – С. 31–35.
3. Трактор ХТЗ-150К-09-25. Руководство по эксплуатации 151.00.000-09-25РЭ. – Украина, Харьков : ПАО «ХТЗ», 2013. – 267 с.
4. Анилович, В. Я. Конструирование и расчет сельскохозяйственных тракторов. Справочное пособие / В. Я. Анилович, Ю. Т. Водолаженко. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1976. – 456 с.
5. Косенко, В. В. Сравнительный тяговый расчет двух тракторов: метод. указания / В. В. Косенко, А. И. Искалиев. – Волгоград: ВолгГТУ, 2018. – 16 с.
6. Кутьков, Г. М. Тяговый расчет трактора: метод. указания / Г. М. Кутьков, А. В. Богатырев. – М.: РГАУ «ТСХА имени К. А. Тимирязева», 2017. – 80 с.

УДК 621.437

Е. А. Захаров, Р. Д. Дудников, Ю. В. Левин, Е. А. Федянов **ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ДОБАВОК СИНТЕЗ-ГАЗА В БЕНЗОВОЗДУШНУЮ СМЕСЬ** **НА ПОКАЗАТЕЛИ РОТОРНО-ПОРШНЕВОГО ДВИГАТЕЛЯ***

Волгоградский государственный технический университет
e-mail: tig@vstu.ru

В статье рассматривается возможность замены добавок свободного водорода как промотора горения в роторно-поршневых двигателях водородосодержащим синтез-газом. Отмечено, что роторно-поршневые двигатели имеют повышенную температуру отработавших газов, что позволяет использовать их теплоту для генерации синтез-газа, осуществляя тем самым термохимическую рекуперацию этой теплоты. Приведены формулы для определения величины добавки синтез-газа, которая обеспечивает заданное соотношение между свободным водородом и основным углеводородным топливом. Дана оценка возможного снижения мощности двигателя при замене добавок свободного водорода добавками синтез-газа.

Ключевые слова: синтез-газ, роторно-поршневой двигатель, процесс сгорания.

Е. А. Zakharov, R. D. Dudnikov, Yu. V. Levin, E. A. Fedyanov **ESTIMATION OF THE INFLUENCE OF SYNTHESIS-GAS ADDITIVES** **IN A GAS-AIR MIXTURE ON THE INDICATORS OF A ROTARY PISTON ENGINE** **Volgograd State Technical University**

The article discusses the possibility of replacing the addition of free hydrogen as a combustion promoter in rotary piston engines with hydrogen-containing synthesis gas. It is noted that rotary piston engines have an increased temperature of the exhaust gases, which allows their heat to be used to generate synthesis gas, thereby performing thermochemical recovery of this heat. Formulas are given for determining the amount of synthesis gas addition, which provides a given ratio between free hydrogen and the main hydrocarbon fuel. An assessment of a possible decrease in engine power when replacing additives of free hydrogen with additives of synthesis gas is given.

Keywords: synthesis gas, rotary piston engine, combustion process.

Одной из причин неполного сгорания топлива и, соответственно, повышенных выбросов углеводородов с отработавшими газами в роторно-поршневых двигателях (РПД), выполненных по схеме Ванкеля, является недогорание топливовоздушной смеси около задней по направлению вращения вершины ротора [1]. В условиях обусловленного вращением ротора однонаправленного движения заряда в камере РПД скорость распространения фронта пламени в сторону, противоположенную вращению ротора, оказывается недостаточной, чтобы достичь указанной вершины до начала процесса выпуска.

В последнее десятилетие опубликованы результаты ряда исследований [2, 3], в которых изучалась возможность повышения скорости распространения пламени и тем самым повышения полноты сгорания топлива в РПД за счет добавок в основную топливовоздушную смесь свободного водорода. Как следует из результатов этих исследований, добавки свободного водорода в бензовоздушные и метановоздушные смеси позволяют снизить удельный расход топлива и заметно уменьшить выбросы несгоревших углеводородов. При этом имеется в виду суммарный расход топлива, включающий и расход добавляемого водорода.

Несмотря на очевидный положительный эффект от добавок свободного водорода, практическое использование подобного способа организации рабочего процесса РПД представляется в настоящее время проблематичным, так как требуется иметь на борту транспортного средства второй вид топлива, а именно водород. Сложности хранения водорода на борту транспортных средств хорошо известны [4], и именно они в значительной мере препятствуют широкому использованию водорода как самостоятельного вида топлива.

В связи со сказанным выше представляет интерес рассмотреть эффективность добавок к основной топливовоздушной смеси синтез-газа, одним из компонентом которого является свободный водород. Синтез-газ может быть генерирован из основного углеводородного топлива непосредственно на борту транспортного средства. При этом появляется возможность дополнительно повысить коэффициент полезного действия двигателя за счет термохимической рекуперации части теплоты отработавших газов. Теплота отработавших газов, которая затрачивается на получение синтез-газа, возвращается с потоком синтез-газа в цикл двигателя.

Положительный опыт, доказывающий возможность генерации синтез-газа из основного углеводородного топлива, получен в результате экспериментов, проведенных на автомобилях с поршневыми двигателями [5]. В роторно-поршневых двигателях условия для осуществления термохимической рекуперации теплоты лучше, чем в поршневых, так как температура отработавших газов выше.

В результате исследований, проведенных в ВолгГТУ [6], установлено, что в автомобильном бензиновом роторно-поршневом двигателе на осредненном режиме городского испытательного цикла ($p_e = 0,2$ МПа, $n = 2000$ мин⁻¹) добавка в бензовоздушную смесь свободного водорода в количестве 5 % от общей массы топлива позволяет примерно на 4 % снизить удельный расход топлива и в 1,5 раза уменьшить выбросы несгоревших углеводородов.

Синтез-газ, получаемый паровой конверсией исходного топлива с поглощением теплоты отработавших газов, содержит примерно 11,5 % свободного водорода и 88,5 % диоксида углерода. Количество такого синтез-газа, которое необходимо добавить в бензовоздушную смесь, чтобы получить такое же соотношение между бензином и водородом, которое было использовано в экспериментах с добавками чистого свободного водорода, можно найти исходя из следующих соображений.

Массовая доля свободного водорода по отношению к горючей части смеси бензина и синтез-газа:

$$g_{H_2} = \frac{g_{H_2}^{CM}}{g_{CH}^{CM} + g_{H_2}^{CM}} = \frac{g_{H_2}^{CF} \cdot g_{CF}^{CM}}{(1 - g_{CF}^{CM}) + g_{H_2}^{CF} \cdot g_{CF}^{CM}}, \quad (1)$$

где $g_{H_2}^{CM}$ и g_{CH}^{CM} – массовые доли свободного водорода и бензина в смеси бензина и синтез-газа, $g_{H_2}^{CF}$ – массовая доля водорода в синтез-газе, g_{CF}^{CM} – массовая доля синтез-газа в смеси с бензином. Выражая из равенства (1) долю синтез-газа как функцию g_{H_2} , получаем:

$$g_{CF}^{CM} = \frac{g_{H_2}}{g_{H_2}^{CF} + (1 - g_{H_2}^{CF}) \cdot g_{H_2}}. \quad (2)$$

График функциональной зависимости (2) представлен на рисунке. Как следует из графика, для того чтобы свободный водород составлял 5 % от суммарной массы свободного водорода и бензина в топливной смеси, массовая доля синтез-газа в этой смеси должна быть около 31 %. Для того чтобы g_{H_2} равнялась 2,5 %, необходимо, чтобы $g_{CF}^{CM} \approx 17,5$ %.

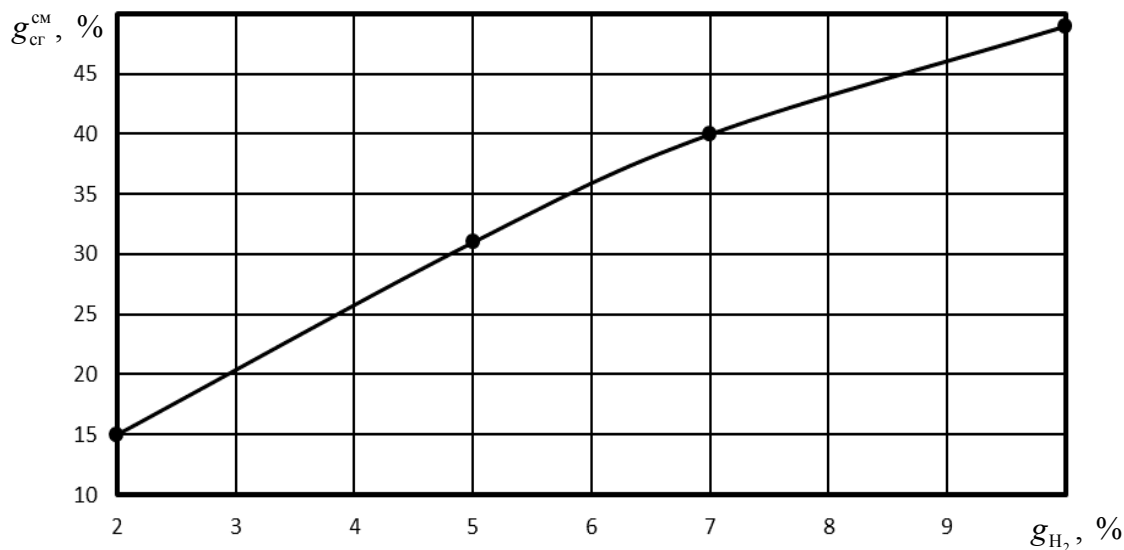


График зависимости соотношения свободного водорода и бензина от массовой доли синтез-газа в топливной смеси

Синтез-газ рассматриваемого состава содержит, кроме свободного водорода, диоксид углерода, наличие которого в топливовоздушной смеси увеличивает долю негорючих компонентов. Соответственно меняется масса воздуха, теоретически необходимая для полного сжигания топлива. Теоретическая масса воздуха, необходимая для полного сгорания 1 кг топлива, состоящего из 82,5 % бензина и 17,5 % синтез-газа, равна 13,04 кг воздуха. Для бензина, содержащего 85,5 % углерода и 14,5 % водорода, теоретически необходимая масса воздуха для полного сгорания 1 кг топлива равна 14,96 кг воздуха.

Вместе с тем, как свидетельствуют расчеты, теплота сгорания смеси бензина с добавкой синтез-газа с воздухом остается практически такой же, как теплота сгорания бензовоздушной смеси: $Q_u \approx 2,76$ МДж/кг. Уменьшение доли горючих компонентов компенсируется увеличением в них доли свободного водорода, обладающего самой высокой среди углеводородных топлив теплотой сгорания на единицу массы.

Недостатком водорода как топлива для ДВС является его малая плотность. Наличие в составе рассматриваемой разновидности синтез-газа 11,5 % свободного водорода приводит к тому, что плотность такого синтез-газа в два с лишним раза ниже плотности воздуха. При давлении 1 бар и температуре 25 °С $\rho_{сг}^* = 0,52$ кг/м³. Если синтез-газ подавать в двигатель на такте впуска, то вследствие его малой плотности массовое наполнение рабочей камеры свежим топливовоздушным зарядом будет снижаться и,

соответственно, будет снижаться мощность двигателя. Можно предполагать, что снижение мощности будет относительно небольшим, так как основным компонентом топливовоздушной смеси является воздух.

Оценим снижение мощности двигателя на указанном выше режиме ($p_e = 0,2$ МПа, $n = 2000$ мин⁻¹) по сравнению с мощностью, полученной на бензине, при условии, что добавка синтез-газа составляет 17,5 % от суммарной массы этой добавки и бензина. Состав топливовоздушной смеси будем считать стехиометрическим ($\alpha=1$).

Мощность РПД с рабочим объемом V_h можно выразить следующим образом:

$$N_e = \rho_{см}^* \cdot V_h \cdot \eta_v \cdot Q_u \cdot \eta_e \cdot n / 60, \quad (3)$$

где $\rho_{см}^*$ – плотность топливовоздушной смеси при условиях окружающей среды, η_v – коэффициент наполнения, η_e – эффективный КПД двигателя, n – частота вращения эксцентрикового вала. Если принять, что коэффициент наполнения определяется только сопротивлением впускного трубопровода, и пренебречь отмеченным выше относительно небольшим влиянием добавок свободного водорода на эффективный КПД, то изменение мощности будет целиком обусловлено изменением плотности топливовоздушной смеси.

При указанных выше условиях в окружающей среде (1 бар и 25 °С) плотность бензовоздушной стехиометрической смеси равна 1,23 кг/м³, а плотность топливовоздушной смеси, топливная составляющая, которой представляет собой

смесь из 82,5 % (по массе) бензина и 17,5 % синтез-газа, составляет 1,2 кг/м³. Из сравнения приведенных значений плотности следует, что их различие не превышает 2,5 %. Если увеличить массовую долю синтез-газа в смеси с бензином до 31 %, что соответствует 5 % содержанию водорода в бензоводородной смеси, то уменьшение плотности топливовоздушной смеси в рабочей камере РПД по сравнению с бензовоздушной смесью будет примерно равно 4 %.

Таким образом, проведенное исследование позволяет сделать вывод о том, что замена добавок свободного водорода добавками синтез-газа не приведет к существенному снижению мощности роторно-поршневого двигателя.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Злотин, Г. Н. Особенности рабочего процесса и пути повышения энергетической эффективности роторно-поршневых двигателей Ванкеля / Г. Н. Злотин, Е. А. Федянов; ВолгГТУ. – Волгоград, 2010. – 120 с.
2. An experimental investigation of hydrogen-enriched gasoline in a Wankel rotary engine / F. Amrouche [et al.] // International Journal of Hydrogen Energy. – 2014. – Т. 39 – Р. 8525 – 8534.
3. Влияние добавки водорода на показатели роторно-поршневого двигателя Ванкеля / Е. А. Федянов [и др.] // Известия ВолгГТУ: научный журнал № 11(5) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2015. – (Серия «Наземные транспортные системы»). – С. 65–68.
4. Мищенко, А. И. Применение водорода для автомобильных двигателей / А. И. Мищенко. – Киев: Наук. думка, 1984. – 143 с.
5. Использование генератора синтез-газа в ДВС автомобиля / О. Ф. Бризицкий [и др.] // Транспорт на альтернативном топливе, 2008. – № 6 (6). – С. 25–28.
6. Федянов, Е. А. Влияние добавок свободного водорода на экологические показатели роторно-поршневого двигателя / Е. А. Федянов [и др.] // Двигателестроение. – 2018. – № 2 (272). – С. 35–38.

УДК 621.433.2

Ю. В. Левин, Е. А. Федянов, А. И. Шадрин

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ ОКСИДОВ АЗОТА В РОТОРНО-ПОРШНЕВЫХ ДВИГАТЕЛЯХ

Волгоградский государственный технический университет

e-mail: tig@vstu.ru

Рассмотрены особенности расчета процесса образования оксидов азота в роторно-поршневых двигателях. На основе моделирования процесса распространения пламени в роторно-поршневом двигателе с двумя свечами зажигания показано, что интенсивности теплоотдачи в стенки рабочей камеры и, соответственно, температуры в зонах горения, инициированного первой и второй свечами зажигания, неодинаковы. Исходя из этого, обоснована необходимость вести расчет равновесного состава продуктов сгорания и процесса образования оксидов азота отдельно для каждой из зон горения.

Ключевые слова: роторно-поршневой двигатель, распространение пламени, оксиды азота.

Yu. V. Levin, E. A. Fedyanov, A. I. Shadrin

SIMULATION OF NITROGEN OXIDE FORMATION IN ROTARY PISTON ENGINES

Volgograd State Technical University

The features of calculating the formation of nitrogen oxides in rotary piston engines are considered. Based on the simulation of the flame propagation process in a rotary piston engine with two spark plugs, it is shown that the intensities of heat transfer to the walls of the working chamber and, accordingly, the temperatures in the combustion zones initiated by the first and second spark plugs are not the same. Based on this, the necessity to calculate the equilibrium composition of combustion products and the process of formation of nitrogen oxides separately for each of the combustion zones is substantiated.

Keywords: rotary piston engine, flame propagation, nitrogen oxides.

В двигателях внутреннего сгорания (ДВС) всех типов наличие оксидов азота в отработавших газах связано с действием трех различных источников. Основным источником образования оксидов азота является процесс высокотемпературного окисления атмосферного

азота в продуктах сгорания за зоной химической реакции фронта пламени. Окисление идет в основном до оксида азота NO. Оксиды азота, образовавшиеся в результате этого процесса, называют термическими. Два других источника появления оксидов азота в отработавших газах –

это низкотемпературное окисление азотосодержащих соединений моторного топлива и взаимодействие с молекулярным азотом свободных углеводородных радикалов в зоне химических реакций фронта пламени. Оксид азота NO, получающийся из азота, содержащегося в топливе, называют топливным NO, а оксид от взаимодействия молекул азота с углеводородными радикалами – быстрым NO.

В двигателях с принудительным искровым зажиганием предварительно подготовленной топливовоздушной смеси на долю термических оксидов азота приходится до 99 % от их общего выброса с отработавшими газами [1], поэтому при расчетной оценке образования этих оксидов в двигателях указанного типа топливные и быстрые NO можно не учитывать.

Последнее в полной мере относится к обра-

зованию оксидов азота в роторно-поршневых двигателях. Интерес в автомобилестроении к двигателям этого типа вновь повысился в связи со все более широким распространением гибридных силовых установок. Для создания роторно-поршневых двигателей, адаптированных к работе в составе таких гибридных установок, важно иметь математические модели рабочего процесса этих двигателей, правильно прогнозирующие, в том числе, выбросы оксидов азота.

Расчет процесса образования термических оксидов азота можно выполнить по уравнению, полученному В. А. Звоновым [1] и учитывающему образование оксида азота как в ходе цепных реакций с участием свободных атомов азота и кислорода, так и в результате бимолекулярной реакции взаимодействия молекул названных газов:

$$\frac{dr_{\text{NO}}}{d\phi} = \frac{p \cdot r_{\text{N}_2}}{249.4 \cdot n \cdot T_b} \left[1 - \frac{(r_{\text{NO}})^2}{K_4 \cdot r_{\text{O}_2} \cdot r_{\text{N}_2}} \right] \cdot \left[\frac{K_{1b} \cdot r_{\text{O}}}{1 + \frac{K_{1p} \cdot r_{\text{NO}}}{K_{2b} \cdot r_{\text{O}_2}}} + \frac{K_{4b} \cdot r_{\text{O}_2}}{2} \right], \quad (1)$$

где ϕ – угол поворота эксцентрикового вала; p – давление в рабочей камере двигателя; n – частота вращения эксцентрикового вала; T_b – температура продуктов сгорания; K_{1b} , K_{1p} , K_{2b} , K_4 , K_{4b} – константы скоростей реакций цепного и бимолекулярного механизмов; r_{N_2} , r_{O_2} , r_{O} – равновесные объемные доли N_2 , O_2 и O в продуктах сгорания.

Значения констант скоростей реакций зависят в соответствии с законом Аррениуса от температуры. Формулы для расчета этих значений приведены в литературе, например в работе [1]. Равновесные концентрации компонентов в продуктах сгорания можно определить путем расчета равновесного состава этих продуктов по одной из известных методик. В частности, достаточно точные результаты получаются при использовании методики [2], основанной на определении равновесных концентраций следующих одиннадцати компонентов: CO_2 , CO , H_2O , H_2 , H , O_2 , OH , N_2 , NO , N , O .

Для расчета равновесного состава продуктов сгорания в каждый момент распространения пламени необходимо знать текущие значения давления и температуры продуктов сгорания. Расчетные значения этих параметров мож-

но получить путем моделирования индикаторного процесса двигателя.

Для моделирования индикаторного процесса, в первую очередь процесса распространения пламени, в поршневых двигателях можно ограничиться двухзонной моделью, в которой фронт пламени отделяет зону продуктов сгорания от зоны топливовоздушной смеси. При этом температуру продуктов сгорания во всем их объеме можно считать одинаковой, так как в большей части процесса распространения пламени сохраняется симметрия относительно очага воспламенения.

В роторно-поршневых двигателях в силу особенностей конструкции камеры сгорания такая симметрия после начала горения быстро нарушается даже в случае воспламенения от одной свечи зажигания. Скорости распространения пламени в сторону вращения ротора выше, чем в противоположенную сторону, и меняются с изменением поперечного сечения камеры сгорания. Соответственно отличаются по зонам горения коэффициенты теплоотдачи в стенки камеры сгорания. В результате значения температуры продуктов сгорания, от которой зависит интенсивность образования оксидов азота, на противоположенных границах зоны продуктов сгорания могут быть неодинако-

выми. Таким образом, при использовании двухзонной модели для описания процесса сгорания даже в роторно-поршневом двигателе с одной свечой зажигания следует отдельно решать дифференциальное уравнение (1) для участка фронта пламени, распространяющегося в сторону передней по ходу вращения вершины ротора, и для аналогичного участка фронта пламени, распространяющегося в сторону задней вершины.

Еще более сложным оказывается расчет процесса образования оксида азота в роторно-поршневом двигателе с двумя свечами зажигания. В этом случае образуются две зоны продуктов сгорания, и условия распространения пламени в них различаются уже в начальный момент горения. На рис. 1 показано примерное положение зон продуктов сгорания относительно поверхности ротора при его положении около ВМТ.

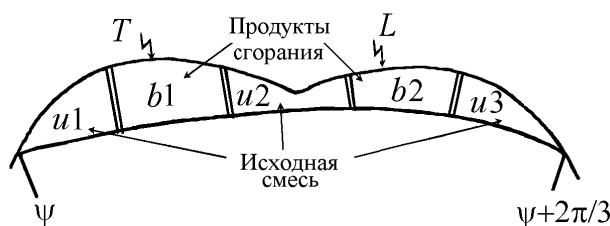


Рис. 1. Расположение зон продуктов сгорания (b_1, b_2) и зон исходной топливовоздушной смеси (u_1, u_2, u_3) в рабочей камере РПД при зажигании от двух свечей зажигания (ψ – угол поворота задней по ходу вращения вершины ротора)

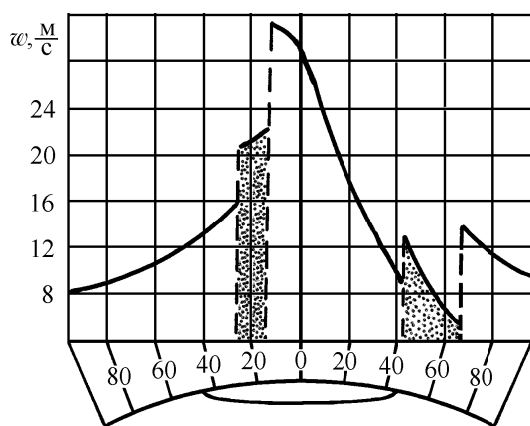


Рис. 2. Расчетные эпюры скорости течения газа в рабочей полости серийного РПД ВА3-311 на режиме $n = 2000 \text{ мин}^{-1}$, $\eta_V = 0,3$; $\alpha = 0,9$ при различных положениях эксцентрового вала двигателя:

□ – свежий заряд; ■ – продукты сгорания

На рис. 2 представлена полученная расчетом [3] картина изменения скоростей течения заряда в рабочей камере роторно-поршневого

двигателя в начальный момент распространения пламени от двух источников зажигания. Зоны продуктов сгорания на рисунке выделены штриховкой. Скачкообразное изменение значений скорости на границах зон обусловлено изменением плотности продуктов сгорания по сравнению с плотностью топливовоздушной смеси. Как видно, скорости течения заряда на границах зоны горения, инициированного свечой зажигания T , (рис. 1) примерно вдвое выше, чем на границах зоны горения, инициированного свечой зажигания L .

При моделировании процесса распространения пламени в РПД локальные коэффициенты теплоотдачи в поверхности статора и ротора определяют [3] на основе известного критериального уравнения Нуссельта:

$$Nu = C_3 \cdot Re^{0,8}, \quad (2)$$

в котором число Рейнольдса вычисляют, принимая за определяющий линейный размер эквивалентный диаметр прямоугольного поперечного сечения камеры сгорания на рассматриваемом локальном участке:

$$d_{\text{эк}} = \frac{2 \cdot F(\psi, \eta)}{H + h_c(\psi, \eta)}, \quad (3)$$

где $F(\psi, \eta)$ – площадь поперечного сечения рабочей камеры при заданном угловом положении ψ ротора и заданной угловой координате η сечения относительно вершины ротора, $h_c(\psi, \eta)$ – высота рабочей камеры в том же сечении, H – ширина рабочей камеры.

Для РПД с заданными соотношениями геометрических размеров коэффициент C_3 в уравнении подобия определяют на основе экспериментальных данных. Для РПД ВА3-311, например, $C_3 = 0,018$ [3].

Из уравнения подобия (2) следует, что коэффициент конвективной теплоотдачи α_c на локальном участке вблизи выбранного сечения с угловыми координатами ψ и η

$$\alpha_c = C_3 \cdot \bar{w}^{0,8} \cdot d_{\text{эк}}^{-0,2} \cdot \lambda_T \cdot \nu_T^{-0,8}. \quad (4)$$

где $\bar{w}$ – скорость течения рабочего тела в заданном сечении рабочей камеры; $d_{\text{эк}}$ – эквивалентный диаметр в этом же сечении; λ_T и ν_T – соответственно теплопроводность и вязкость рабочего тела. Увеличение скорости течения заряда в поперечном сечении камеры сгорания вдвое приводит при прочих равных условиях, как следует из выражения (4), к росту коэффициента теплоотдачи в 1,74 раза.

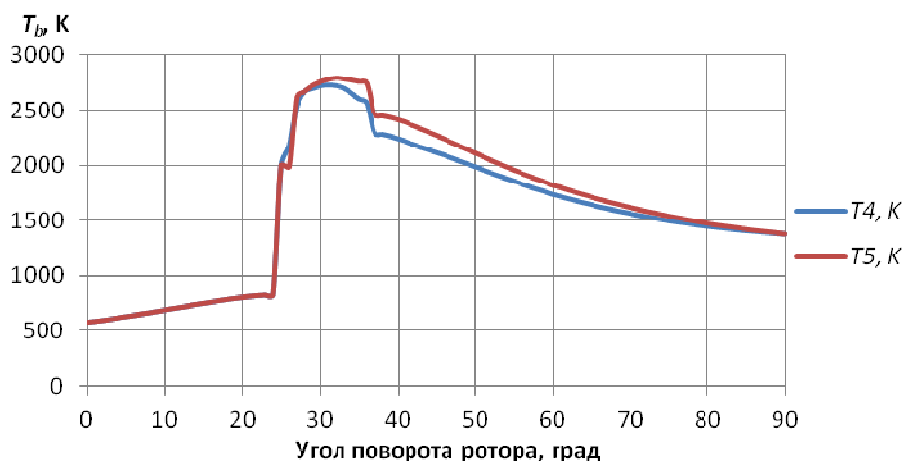


Рис. 3. Изменение температур продуктов сгорания в зонах b_1 (кривая T_4) и b_2 (кривая T_5) по углу поворота ротора

На рис. 3 приведены полученные с помощью математической модели (4) распространения пламени в роторно-поршневом двигателе с двумя свечами зажигания значения температур продуктов сгорания в зонах b_1 и b_2 . Режим работы двигателя, для которого получены значения температур, такой же, как указан на рис. 2. В зоне b_1 , горение в которой инициировано свечой T и в которой теплоотдача в стенки рабочей камеры выше, температура продуктов сгорания примерно на $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ниже, чем в зоне b_2 , горение в которой инициируется свечой L . Учитывая сильное влияние температуры на скорость протекания химических реакций, указанное различие в температурах продуктов сгорания между зонами, может приводить к заметному различию в образовании в этих зонах ок-

сидов азота. Исходя из этого расчет количества оксидов азота, образующихся при горении в РПД с двумя свечами зажигания, следует проводить по каждой из зон продуктов сгорания.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Звонов, В. А. Токсичность двигателей внутреннего сгорания. – М.: Машиностроение, 1981. – 160 с.
2. Злотин, Г. Н. Методика расчета термохимических характеристик сгорания углеводородных топлив / Г. Н. Злотин, С. Н. Шумский, М. В. Дульгер // Известия ВУЗов. Энергетика. – 1988. – № 8. – С. 58–63.
3. Дульгер, М. В. Улучшение экономических и токсических показателей роторно-поршневых двигателей путем оптимизации их конструктивных параметров: дисс. ... канд. тех. наук 05.04.02 / Дульгер Марк Вадимович. – Волгоград, 1984.

Ответственный за выпуск редактор РИО
В. В. Свитачева

Компьютерная верстка:
Е. В. Макарова

Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-64543 от 22 января 2016 г.
Федеральной службы по надзору в сфере связи, информационных технологий
и массовых коммуникаций (Роскомнадзор)

Учредитель:
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Волгоградский государственный технический университет» (ВолгГТУ)

Адрес редакции и издателя: 400005, г. Волгоград, просп. В. И. Ленина, 28.
Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ)
Гл. редактор, тел.: +7 (8442) 23-00-76
E-mail: rector@vstu.ru

Темплан 2021 г. (научные издания). Поз. № 7ж. Дата выхода в свет 12.03.2021 г. Формат 60 × 84 1/8.
Бумага офсетная. Печать офсетная. Усл. печ. л. 4,19. Уч.-изд. л. 3,70.
Тираж 100 экз. Свободная цена. Заказ №

Оригинал-макет и электронная версия подготовлены РИО Издательства ВолгГТУ
400005, г. Волгоград, просп. В. И. Ленина, 28, корп. 7.

Отпечатано в типографии Издательства ВолгГТУ
400005, г. Волгоград, просп. В. И. Ленина, 28, корп. 7.

К СВЕДЕНИЮ АВТОРОВ

В научно-техническом журнале «ЭНЕРГО- И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ» публикуются статьи, которые содержат результаты теоретических и экспериментальных исследований, представляют научный и практический интерес для широкого круга специалистов в области экономики.

Вопрос об опубликовании статьи или ее отклонении решает редакционная коллегия журнала, которая утверждается ректором университета, ее решение является окончательным. Редколлегия направляет представленный для издания материал на рецензирование.

Рукопись должна быть набрана и сверстана в текстовом редакторе Word и распечатана на лазерном принтере в режиме полной загрузки тонера. Формат бумаги А4 (210×297 мм).

Для ускорения подготовки издания необходимо представлять файлы статей на компакт-дисках (CD) в полном соответствии с распечатанным оригиналом. Диск должен быть вложен в отдельный конверт, на этикетке указываются фамилии авторов статьи.

При наборе текста следует соблюдать следующие требования: поля – верхнее – 2,0 см; нижнее – 3,0 см; левое – 2,5 см; правое – 2,5 см; шрифт Times, кегль 14, интервал полуторный.

Текст набирается с применением автоматического переноса слов, перед знаками препинания (в том числе внутри скобок) пробелы не допускаются, после них ставится один пробел. Разрядка слов не допускается, следует избегать перегрузки статей большим количеством формул, рисунков, таблиц. Для набора символов в формульном редакторе MS Equation (MS Word) использовать установки (Стиль/Размеры) только по умолчанию; рисунки должны быть выполнены в редакторах векторной графики, таких как CorelDRAW или в любом приложении к Word. Допускается сканирование рисунков в программе Microsoft Photo Editor.

Инициалы и фамилия автора (авторов) пишутся над заглавием статьи. Ниже заглавия, перед основным текстом, указывается организация или предприятие, где работает автор статьи. В конце статьи ставится полное название учреждения, которое рекомендует статью для публикации, дата и подпись автора (всех авторов).

Литературные ссылки должны быть оформлены в соответствии с ГОСТ 7.1–2003 «Библиографическая запись. Библиографическое описание. Общие требования и правила составления». Библиографический список использованной литературы, составленный в порядке упоминания в тексте, дается в конце статьи; связь с основным текстом осуществляется цифровым порядковым номером в квадратных скобках в строке. Подстрочные ссылки не допускаются.

Иностранные фамилии и термины в тексте следует приводить в русском переводе. В библиографическом списке фамилии авторов, полное название книг и журналов приводятся на языке оригинала.

Ссылки на неопубликованные работы не допускаются.

При обозначении единиц физических величин должна применяться Международная система единиц (СИ).

Объем статьи не должен превышать 8 страниц бумаги формата А4, включая таблицы и библиографический список; число рисунков – не более четырех, включая рисунки, помеченные буквами *a*, *b*, и т. д. Рекомендуется включать в сборник статьи с авторским коллективом не более четырех человек с участием каждого автора в одной-двух статьях.

Статьи должны представлять сжатое четкое изложение результатов, полученных автором без повторов приводимых данных в тексте статьи, таблицах и рисунках. К статье должны быть приложены: сведения об авторах (полное имя, отчество, фамилия, ученая степень, звание, домашний адрес, номер телефона служебный, домашний, E-mail); документация, подтверждающая возможность ее открытого опубликования.