

При 3D моделюванні газообміну двотактного двигуна з напівсферичної камерою згоряння, зовнішньому і внутрішньому сумішоутворенню визначені маси свіжого заряду і продуктів згоряння в циліндрі, які до 9 % відрізняються від експериментальних даних. Перехід до внутрішнього сумішоутворення дозволив до 41 % знизити значення коефіцієнта залишкових газів

Ключові слова: двотактний двигун, камера згоряння, залишкові гази, сумішоутворення, моделювання, процеси газообміну

При 3D моделировании газообмена двухтактного двигателя с полусферической камерой сгорания, внешнем и внутреннем смесеобразованиях определены массы свежего заряда и продуктов сгорания в цилиндре, которые до 9 % отличаются от экспериментальных данных. Переход к внутреннему смесеобразованию позволил до 41 % снизить значения коэффициента остаточных газов

Ключевые слова: двухтактный двигатель, камера сгорания, отработавшие газы, смесеобразование, моделирование, процессы газообмена

УДК 621.43.013.9

DOI: 10.15587/1729-4061.2016.59789

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТИПА СМЕСЕОБРАЗОВАНИЯ И ФОРМЫ КАМЕРЫ СГОРАНИЯ НА ЗНАЧЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ОСТАТОЧНЫХ ГАЗОВ

В. А. Корогодский

Кандидат технических наук, доцент*

*Кафедра теплотехники и тепловых двигателей

E-mail: korogodskiy@mail.ru

А. А. Хандримайлов

Кандидат технических наук, доцент**

E-mail: khandrym@mail.ru

О. Н. Стеценко

Аспирант*

E-mail: stetsenko.oksana@mail.ru

*Кафедра теплотехники и тепловых двигателей***

Кафедра теоретической механики и гидравлики*

***Украинский государственный университет

железнодорожного транспорта

пл. Фейербаха, 7, г. Харьков, Украина, 61050

1. Введение

Процессы газообмена, особенно в двухтактных двигателях внутреннего сгорания (ДВС), оказывают определяющее влияние на мощность, экономичность и содержание вредных веществ (ВВ) в отработавших газах (ОГ). Одним из основных показателей, характеризующих качество протекания процессов газообмена, является коэффициент остаточных газов (γ), определяемый отношением количества молей продуктов сгорания (ПС) к количеству молей свежего заряда в цилиндре двигателя после газообмена [1]. Количество остатков ПС в цилиндре двигателя влияет на количество поступившего свежего заряда. Чем меньше останется в цилиндре ПС, тем больше заполнится надпоршневая полость свежим зарядом и тем больше будет получено полезной работы при сгорании топлива. Поэтому снижение количества остатков ПС в цилиндре способствует повышению мощности двигателя. При этом содержание остатков ПС в виде инертных газов в составе топливовоздушной смеси (ТВС) влияет на интенсивность протекания процессов сгорания и на образование концентраций ВВ в ОГ. В свою очередь, обеднение ТВС до стехиометрического состава способствует снижению

концентрации оксидов углерода (СО) и несгоревших углеводородов (C_mH_n) в ОГ, но при этом увеличивается содержание оксидов азота (NO_x), концентрация которых может быть снижена рациональным количеством в составе ТВС остатков ПС. Количество остатков ПС в цилиндре двигателя можно регулировать рециркуляцией ОГ.

Основное влияние на содержание ПС в ТВС, на значения коэффициента остаточных газов оказывают процессы газообмена, которые организованы конструктивными особенностями двигателя на впуске, в надпоршневой полости и на выпуске. Также конструкция двигателя должна быть адаптирована под особенности организации процессов смесеобразования и сгорания. Возникает комплекс задач по определению взаимного влияния процессов газообмена, смесеобразования, сгорания и, в частности, количества остатков ПС в цилиндре на технико-экономические и экологические показатели двигателя. Поэтому, определение влияния типа смесеобразования и особенностей конструкции двигателя, в частности формы камеры сгорания (КС), фактического количества ПС в свежем заряде без принудительной рециркуляции ОГ на значения коэффициента остаточных газов является актуальным.

2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

Для повышения показателей газообмена двухтактного двигателя с кривошипно-камерной продувкой разработаны одномерные математические модели рабочего процесса, учитывающие особенности его конструкции [2, 3]. С учетом результатов экспериментальных исследований математические модели рабочего процесса позволяют предварительно оценить конструктивные мероприятия, способствующие повышению технико-экономических показателей двигателя. Однако одномерная постановка и решение задач процессов газообмена не учитывает местные детальные конструктивные особенности элементов газовоздушного тракта, что ограничивает применение данного типа моделей.

Разработанная математическая модель двумерно-осесимметричного нестационарного турбулентного движения воздуха и газа в цилиндре двигателя при впуске и сжатии для плоского поршня с камерой сгорания в поршне, при наличии и при отсутствии закрутки заряда на впуске позволяет определить интенсивность и масштаб турбулентности в конце такта сжатия при асимметричном расположении продувочных окон. Двухмерная модель позволяет расширить возможности управления структурой потока в цилиндре и осуществить газообмен, удовлетворяющий требованиям технологии изготовления деталей двигателя [4], но не учитывает взаимодействие потоков в объеме и не описывает в полной мере общую картину газодинамических процессов, протекающих в полостях двигателя, что также сокращает возможность применения подобных моделей.

Использование 3D газодинамических моделей для совершенствования конструкции двухтактных двигателей расширяет возможности на более высоком количественном и качественном уровне оптимизировать конструкцию рабочего цилиндра с функциональными каналами, впускными, продувочными и выпускными окнами, а также с учетом использования кривошипной камеры, выпускной системы оценивать перспективность разработки еще на стадии проектирования [5, 6]. Применение CFD (Computational fluid dynamics) моделирования позволяет изучить особенности протекания процессов продувки цилиндра и получить удовлетворительные результаты по сравнению с экспериментальными данными [7]. Технология CFD моделирования способствует исследованию взаимного влияния процессов газообмена, смесеобразования и сгорания на технико-экономические показатели двигателя, а также дает возможность оценить содержание ВВ в ОГ. При использовании экспериментально калиброванных моделей показана возможность организации более эффективных процессов газообмена двигателя, работающего по двухтактному циклу относительно четырехтактного цикла на режимах максимальных нагрузок [8]. Также заслуживает внимание и экспериментальные исследования, проведенные на двигателе с клапанным газораспределением и НВТ, работающем по двухтактному циклу. Результаты исследований позволяют оценить и в частности сравнить при моделировании уровень топливной экономичности и токсичности ОГ по многопараметровым характеристикам двигателя с рабочим

процессом CAI (Controlled Auto Ignition) [9]. Численный анализ с помощью программного обеспечения ANSYS FLUENT CFD 14.5 показывает тенденции влияния конструктивных особенностей КС, днища поршня и расположение продувочных каналов в двухтактном двигателе с петлевой продувкой на качество очистки цилиндра от ПС при газообмене. Выявлена перспективность применения полусферической КС [10]. На экономичность и уровень снижения NO_x в ОГ влияет количество остатков ПС. В статье представлены результаты CFD моделирования при различном количестве остатков ПС. Показано, что для уменьшения содержания NO_x в ОГ и стабильного протекания процессов сгорания целесообразно использовать до 35 % остатков ПС. Представленные данные могут быть использованы в качестве ориентира при организации рабочих процессов ДВС [11].

Современные пакеты программного обеспечения (AVL, ANSYS, FLUENT, OpenFOAM и т. д.) для 3D моделирования газодинамических процессов в полостях двигателей имеют несомненные достоинства и могут быть использованы в учебных целях, однако, внедрение их в производство ограничивается их высокой лицензионной стоимостью, что является основной проблемой. Поэтому развитие украинского программного продукта видится более целесообразным для экономики страны и в итоге менее затратным. В связи с этим исследование трехмерных газодинамических процессов проводилось с использованием отечественного 3D программного комплекса MTFs® [12]. Солвер для решения уравнений Навье-Стокса использует неявную разностную схему 2-го порядка точности по времени и по пространственным координатам. Турбулентные газодинамические процессы описываются при помощи модели турбулентности k-ε. Предварительные результаты исследований с помощью программного комплекса MTFs® адекватно коррелируются с экспериментальными данными [13].

3. Цель и задачи исследований

Целью настоящих исследований является определение значений коэффициента остаточных газов в двухтактном двигателе с искровым зажиганием и полусферической КС при организации внешнего и внутреннего смесеобразования на режимах нагрузочной характеристики ($n=3000 \text{ мин}^{-1}$).

Задачами исследований являются:

- определение значений коэффициента остаточных газов в двухтактном двигателе с внешним смесеобразованием (карбюраторная система питания) путем отбора газовых проб из цилиндра на такте сжатия и из выпускной системы и разработка 3D модели процессов газообмена на основании полученных экспериментальных данных, определение её адекватности по значениям коэффициента ОГ;

- определение количества свежего заряда в цилиндре двигателя с внутренним смесеобразованием (НВТ) при организации РТВЗ и РОТВЗ путем отбора газовых проб из выпускной системы двигателя и адаптация 3D модели процессов газообмена к условиям внутреннего смесеобразования, определение её адекватности по количеству свежего заряда в цилиндре двигателя;

– определение количества продуктов сгорания с внутренним смесеобразованием путем 3D моделирования процессов газообмена и расчет значений коэффициента остаточных газов при изменении нагрузки;
 – анализ полученных результатов и разработка рекомендаций по рационализации значений коэффициента остаточных газов за счет изменения конструктивных особенностей двигателя.

4. Определение значений коэффициента остаточных газов с учетом типа смесеобразования и формы камеры сгорания

Исследования по определению влияния внешнего смесеобразования с карбюраторной системой питания и при внутреннем смесеобразовании с непосредственным впрыскиванием топлива (НВТ) проводилось на двухтактном одноцилиндровом двигателе ДН-4 (S/D=87/82) с искровым зажиганием, воздушным охлаждением и кривошипно-камерной продувкой на режимах нагрузочной характеристики при $n=3000 \text{ мин}^{-1}$.

На двигателе с карбюратором использовалась симметричная полусферическая КС, объём которой соответствует действительной степени сжатия $\epsilon_d=6$. При применении НВТ для организации расслоенного топливно-воздушного заряда (РТВЗ) использовалась смещенная к выпускному окну полусферическая КС, объём которой соответствует $\epsilon_d=8,4$. Для организации расслоенного обедненного топливно-воздушного заряда (РОТВЗ) использовалась симметричная полусферическая КС с соответствующим объёмом при $\epsilon_d=11,3$.

Для получения адекватных значений коэффициента γ на режимах нагрузочной характеристики при $n = 3000 \text{ мин}^{-1}$ 3D моделированием процессов газообмена были проведены экспериментальные исследования двигателя ДН-4 на кафедре ДВС Национального технического университета «Харьковский политехнический институт» (Украина). Проводился отбор газовых проб из цилиндра на такте сжатия и из выпускной системы двигателя с карбюратором газоанализатором СТ 300.02. По полученным данным концентраций газов O_2 , CO , CO_2 , C_mH_n и с помощью известной методики [14] рассчитаны значения коэффициента остаточных газов. Также в качестве граничных условий в 3D модели использовались экспериментальные данные, учитывающие теплофизические свойства рабочего тела при работе двигателя ДН-4М с НВТ и организацией РТВЗ и РОТВЗ. Задавались значения давления и температуры на впуске и в выпускной системе за выпускным окном в зависимости от времени по зарегистрированным экспериментальным данным.

При этом, чтобы приблизить условия при 3D моделировании газообмена к условиям эксперимента параметры ОГ в цилиндре двигателя на момент открытия выпускного окна задавались исходя из данных индцирования по изменению угла поворота коленчатого вала. Процесс моделирования продолжался от момента открытия выпускного окна до достижения поршня ВМТ. В начальный расчетный момент времени при открытии выпускного окна области цилиндра и выпускного канала инициализировались первой компонентой, названной “отработавшие газы”, для которых задавались соответствующие теплофизические свойства. Область продувочных каналов и кривошипной камеры инициализировалась второй компонентой, названной “воздух”. При дальнейшем движении поршня и открытии продувочного окна наблюдается поступление из кривошипной камеры в цилиндр свежего заряда, который вытесняет из цилиндра в выпускную систему ПС, частично перемешанные со свежим зарядом (рис. 1–4).

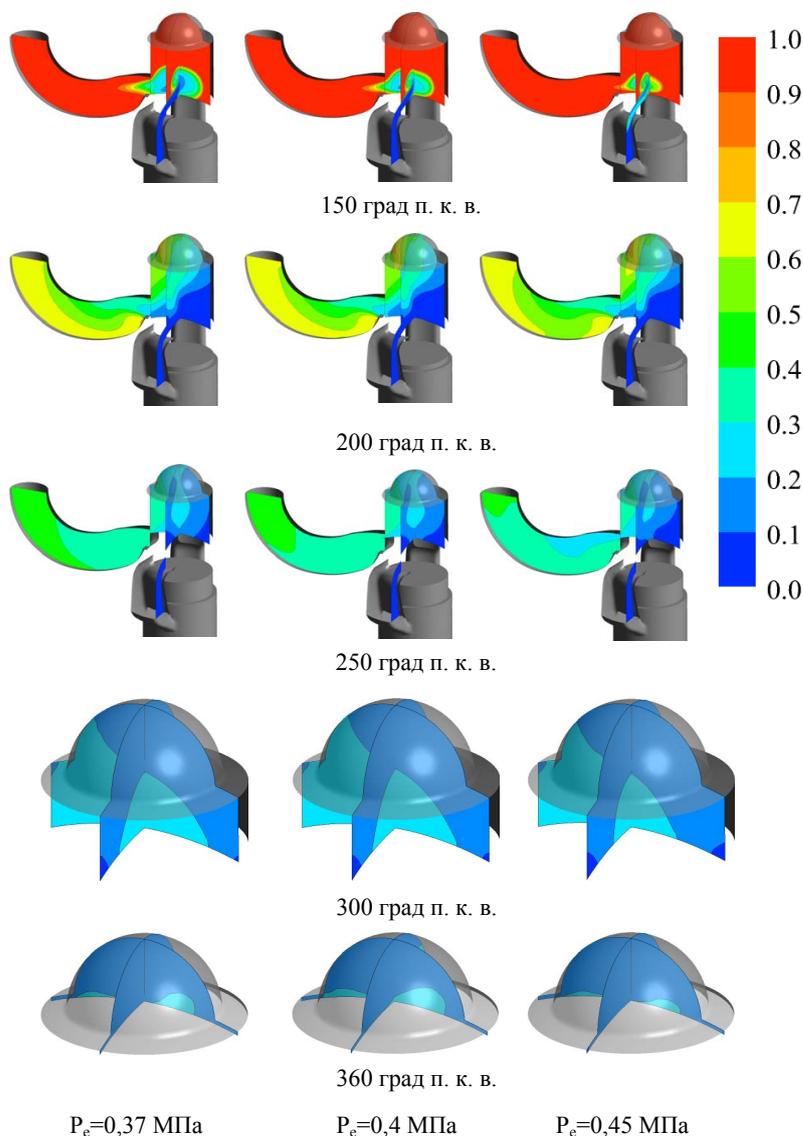


Рис. 1. Изменение концентрации свежего заряда и продуктов сгорания по углу п. к. в. двигателя с карбюратором и полусферической симметричной КС на режимах нагрузочной характеристики при $n=3000 \text{ мин}^{-1}$

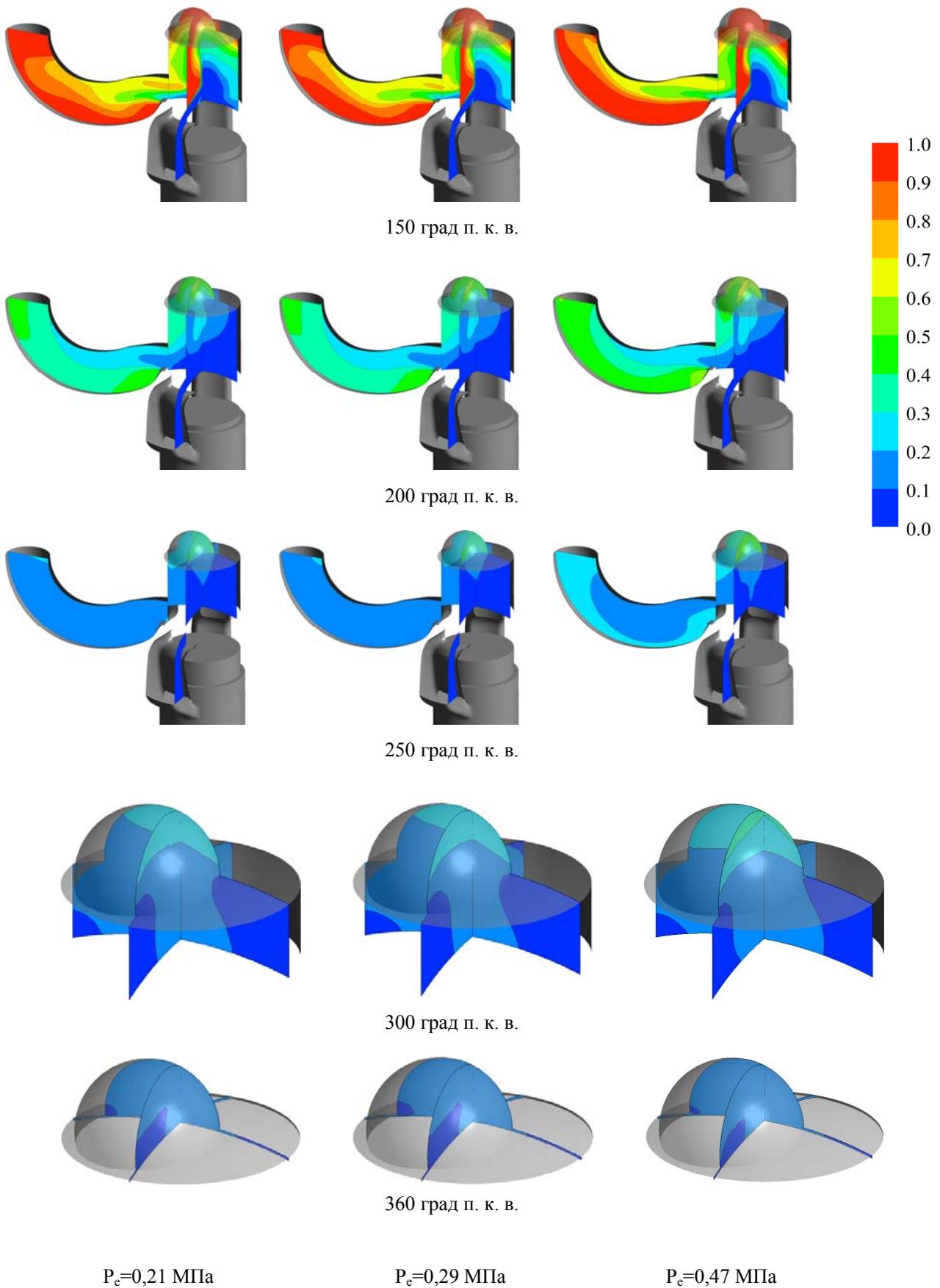


Рис. 2. Изменение концентрации свежего заряда и продуктов сгорания по углу п. к. в. двигателя с НВТ при РТВЗ и полусферической смещенной КС на режимах нагрузочной характеристики при $n=3000$ мин⁻¹

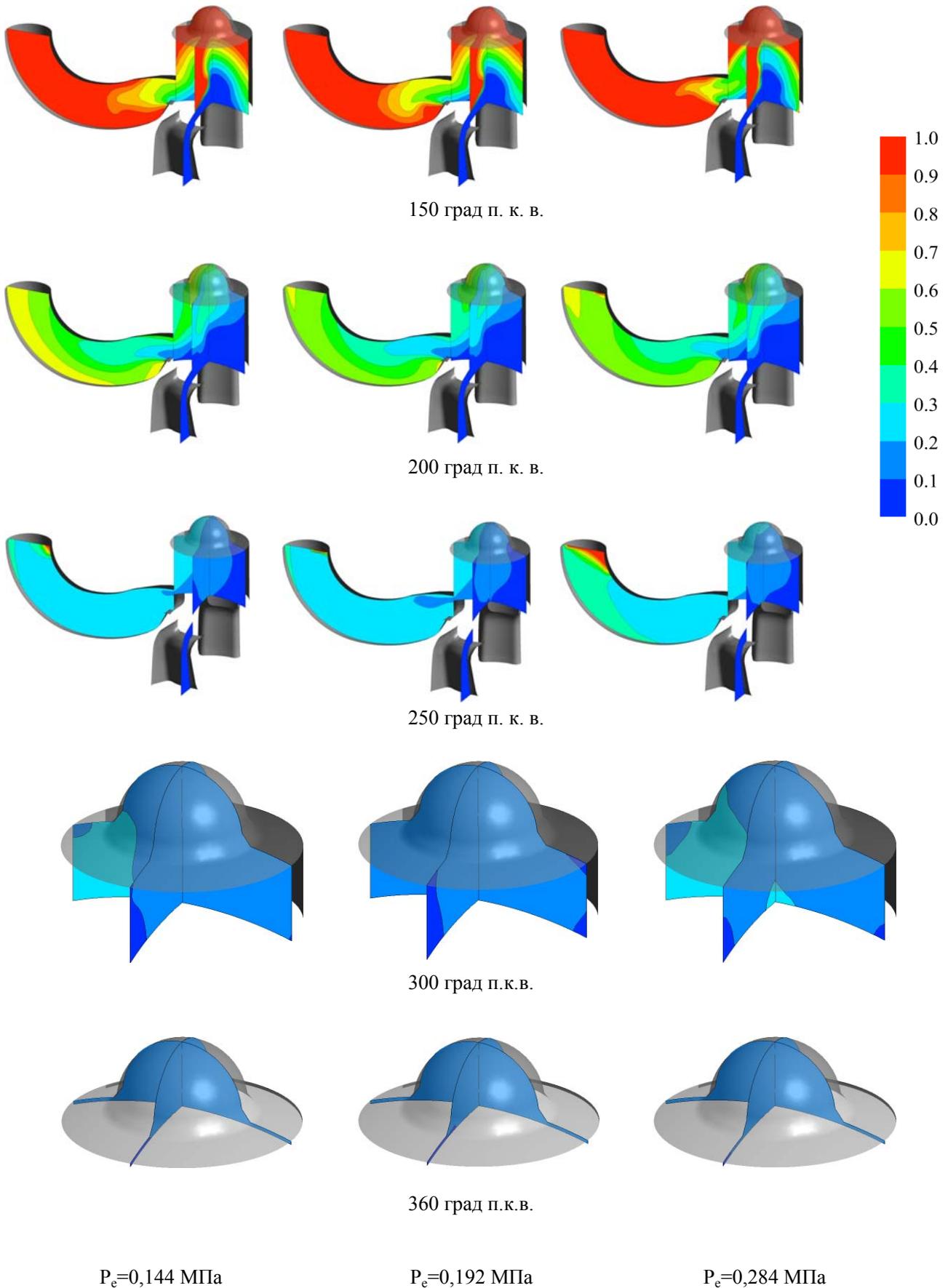


Рис. 3. Изменение концентрации свежего заряда и продуктов сгорания по углу п. к. в. двигателя с НВТ при РОТВЗ и полусферической симметричной КС на режимах нагрузочной характеристики при $n=3000 \text{ мин}^{-1}$

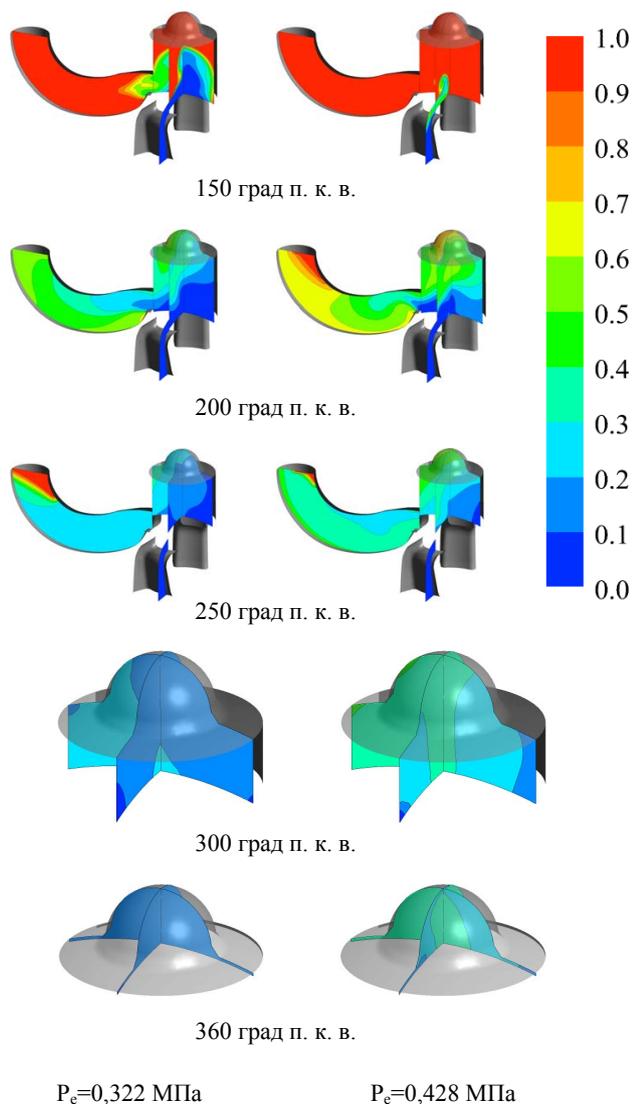


Рис. 4. Изменение концентрации свежего заряда и продуктов сгорания по углу п. к. в. двигателя с НВТ при РОТВЗ и полусферической симметричной КС на режимах нагрузочной характеристики при $n=3000 \text{ мин}^{-1}$

5. Анализ результатов исследований газообмена двигателя ДН-4

В результате 3D моделирования процессов газообмена двигателя ДН-4 с симметричной КС при внешнем смесеобразовании (карбюраторная система питания) (рис. 1) на режимах нагрузочной характеристики ($P_e=0,37 \text{ МПа}$, $P_e=0,4 \text{ МПа}$ и $P_e=0,45 \text{ МПа}$) получены значения массы свежего заряда ($G_{\text{св. зар. цил}}$) и продуктов сгорания ($G_{\text{пс. цил}}$) в цилиндре, которые до 3 % отличаются от данных, полученных экспериментальным путем (рис. 5). На основании полученных экспериментальных и расчетных данных $G_{\text{св. зар. цил}}$ и $G_{\text{пс. цил}}$ определены значения коэффициента γ . С повышением нагрузки от $P_e = 0,174 \text{ МПа}$ до $P_e = 0,45 \text{ МПа}$ количество ПС в цилиндре возрастает незначительно, поэтому с увеличением количества свежего заряда уровень значений γ в двигателе с симметричной КС и карбюраторной системой питания снижается с 0,24 до 0,17 (рис. 6).

При 3D моделировании процессов газообмена двигателя ДН-4М со смещенной к выпускному окну полусферической КС при НВТ и РТВЗ (рис. 2) количество $G_{\text{св. зар. цил}}$ в диапазоне повышенных нагрузок (от $P_e=0,35 \text{ МПа}$ до $P_e=0,47 \text{ МПа}$) практически не отличается от экспериментальных данных (рис. 5). С понижением нагрузки от $P_e=0,35 \text{ МПа}$ до $P_e=0,21 \text{ МПа}$ разница между результатами расчета $G_{\text{св. зар. цил}}$ и экспериментальными данными возрастает до 7%. Количество $G_{\text{пс. цил}}$ при снижении нагрузки уменьшается практически в 2 раза, а уровень значения γ снижается незначительно с 0,15 до 0,13 (рис. 6).

При 3D моделировании процессов газообмена двигателя ДН-4М с симметричной полусферической КС при НВТ и РОТВЗ (рис. 3, 4) количество $G_{\text{св. зар. цил}}$ с понижением нагрузки от максимальных значений до $P_e=0,32 \text{ МПа}$ практически соответствует экспериментальным данным (рис. 5). При дальнейшем понижении нагрузки до минимальных значений ($P_e=0,144 \text{ МПа}$) разница между результатами расчета $G_{\text{св. зар. цил}}$ и экспериментальными данными возрастает до 9%. При этом, с повышением нагрузки до $P_e=0,24 \text{ МПа}$ количество $G_{\text{пс. цил}}$ практически не изменяется, а уровень значения γ снижается с 0,16 до 0,13. Дальнейшее повышение до максимальной нагрузки ($P_e=0,428 \text{ МПа}$) характеризуется планомерным возрастанием γ до 0,4.

Уровень значений коэффициента γ в двухтактном двигателе предопределяется количеством молей ПС и количеством молей свежего заряда в цилиндре после осуществления газообмена и закрытия выпускного окна на такте сжатия. Если сравнивать массы свежего заряда ($G_{\text{св. зар. цил}}$) оставшегося в цилиндре при внешнем смесеобразовании (карбюраторная система питания) и при внутреннем смесеобразовании (НВТ), то исходя из результатов исследований видно, что на режимах максимальных нагрузок большее количество $G_{\text{св. зар. цил}}$ соответствует двигателю с НВТ (рис. 5). В первую очередь меньшие значения $G_{\text{св. зар. цил}}$ при использовании карбюратора объясняются наличием в нем диффузора, который создает сопротивление на впуске и уменьшает количество поступающего в двигатель воздушного заряда при прочих равных условиях и полностью открытой дроссельной заслонке. На двигателе же с НВТ установлена воздушная заслонка, но без наличия диффузора. С понижением нагрузки до минимальных значений также количество $G_{\text{св. зар. цил}}$ больше в двигателе с НВТ по сравнению с карбюраторной системой питания вследствие меньшего дросселирования воздушного заряда на впуске при прикрытии дросселя, о чем свидетельствуют меньшие значения разряжения ($\Delta P_{др}$) за воздушной заслонкой (рис. 6). При этом необходимо отметить, что работа двигателя с НВТ при организации РТВЗ на режимах частичных нагрузок до $P_e=0,35 \text{ МПа}$ осуществлялась при прикрытии воздушной заслонки, а с повышением нагрузки до максимальных значений ($P_e=0,47 \text{ МПа}$) – с полностью открытой воздушной заслонкой. В свою очередь, при организации РОТВЗ режим работы двигателя с полностью открытой воздушной заслонкой наблюдается в более широком диапазоне нагрузок от $P_e=0,32 \text{ МПа}$ до максимальной нагрузки ($P_e=0,48 \text{ МПа}$). Большее количество $G_{\text{св. зар. цил}}$ при РОТВЗ по отношению к РТВЗ позволило при ограничении содержания СО в ОГ до

1 % эффективнее использовать цикловую подачу топлива и повысить значения максимальной мощности.

Также большее количество $G_{св. зар. цил}$ при организации РОТВЗ в сравнении с РТВЗ и рациональном регулировании мощности способствовало повышению значений коэффициента избытка воздуха (α) и снижению удельного эффективного расхода топлива (g_e) на режимах нагрузочной характеристики при $n=3000 \text{ мин}^{-1}$ на $5 \div 20 \%$ до $g_{e \text{ min}}=252 \text{ г/(кВт}\cdot\text{ч)}$. При этом во всем диапазоне нагрузок зарегистрировано снижение количества выбросов ВВ с ОГ (CO и C_mH_n), что позволяет выполнить современные требования по токсичности ОГ для данного типа двигателей без применения трехкомпонентного нейтрализатора ОГ [15].

Для определения значений коэффициента γ наряду с количеством свежего заряда ($G_{св. зар. цил}$) в цилиндре двигателя необходимо определить количество ПС ($G_{пс. цил}$) при закрытии органов газораспределения. Качество очистки цилиндра от ПС в основном зависит от газодинамических процессов вытеснения свежим зарядом ПС в выпускную систему. В процессе очистки цилиндра от ПС одна часть ПС полностью вытесняется из цилиндра, другая часть ПС, перемешиваясь со свежим зарядом, также частично вытекает в выпускную систему и частично остается в надпоршневом объеме. На количество оставшихся ПС в надпоршневом объеме влияют и не продутые свежим зарядом зоны. В цилиндре двигателя ДН-4 используется петлевая двухканальная симметричная система продувки.

При внешнем смесеобразовании с карбюраторной системой питания применяется симметричная полусферическая КС, которая имеет больший объем по сравнению с использованием при НВТ, в связи с меньшим значением степени сжатия. Поэтому относительно больший диаметр горловины КС способствует более полному вытеснению ПС свежим зарядом из её объема при меньшем перемешивании между собой газов, что подтверждается представленными визуализированными картинками расчетов по распределению концентрации газов при 3D моделировании процессов газообмена (рис. 1). Количество $G_{пс. цил}$ с повышением нагрузки от $P_e=0,174 \text{ МПа}$ до $P_e=0,45 \text{ МПа}$ увеличивается на 20 % (рис. 5).

При внутреннем смесеобразовании с НВТ и РТВЗ применяется смещенная к выпускному окну полус-

ферическая КС. Характер движения газовых потоков в надпоршневом объеме, расположение КС, меньший диаметр горловины и объем КС (рис. 2) относительно симметричной КС, используемой при карбюраторе, позволили на частичных нагрузках ($P_e=0,149 \div 0,24 \text{ МПа}$) уменьшить до 41 % количество $G_{пс. цил}$. Однако, с повышением до максимальной нагрузки ($P_e=0,47 \text{ МПа}$) количество $G_{пс. цил}$ осталось на уровне карбюраторного двигателя (рис. 5).

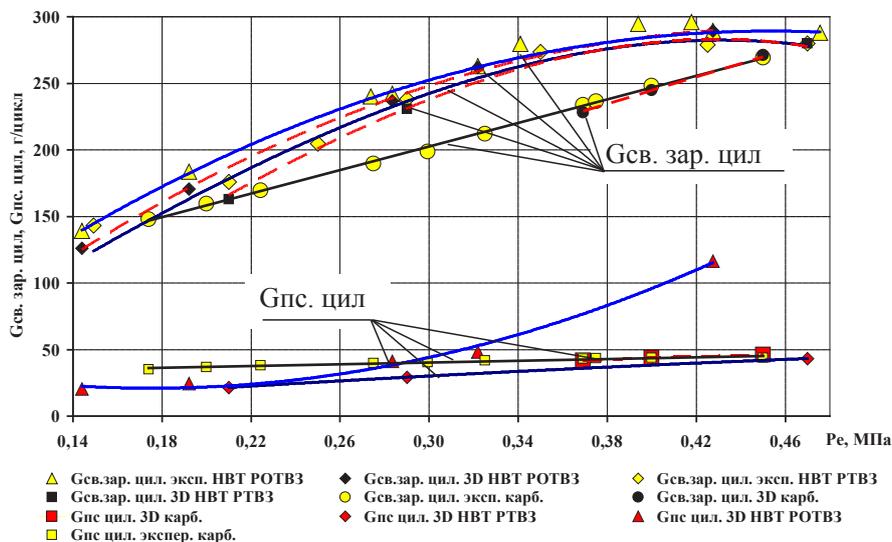


Рис. 5. Изменение количества свежего заряда ($G_{св. зар. цил}$) и продуктов сгорания ($G_{пс. цил}$) в цилиндре двигателя с карбюратором (сим. КС), НВТ с РТВЗ (смещ. КС) и НВТ с РОТВЗ (сим. КС) по нагрузочной характеристике при $n=3000 \text{ мин}^{-1}$

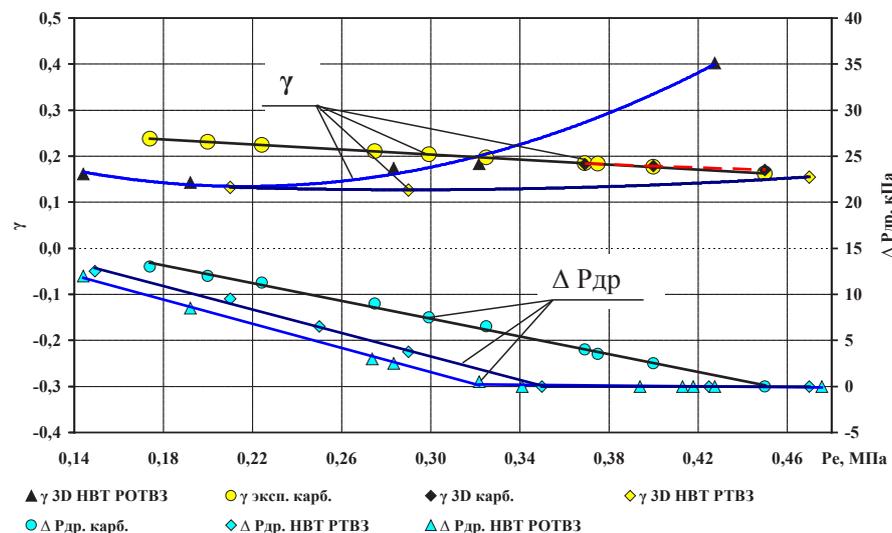


Рис. 6. Изменение коэффициента остаточных газов (γ) и дросселирования воздуха на впуске ($\Delta P_{др}$) двигателя с карбюратором, НВТ с РТВЗ и НВТ с РОТВЗ по нагрузочной характеристике при $n=3000 \text{ мин}^{-1}$

При внутреннем смесеобразовании с НВТ и РОТВЗ применяется симметричная полусферическая КС, но меньшего объема по сравнению с КС используемой при карбюраторной системе питания. Характер движения газовых потоков (рис. 3, 4), уменьшенный объем и диаметр горловины КС позволили на режимах частичных нагрузок от $P_e=0,144 \text{ МПа}$ до $P_e=0,24 \text{ МПа}$ сократить количество $G_{пс. цил}$ до уровня, полученного

при организации РТВЗ и смещенной к выпускному окну полусферической КС. При дальнейшем повышении нагрузки до $P_e=0,428$ МПа и 3D моделировании процессов газообмена наблюдается ухудшение очистки ПС из КС (рис. 4), что приводит к увеличению количества $G_{пс.цил.}$ более чем в 4 раза (рис. 5).

Одним из эффективных способов снижения количества $G_{пс.цил.}$ и значений коэффициента γ может быть использование дополнительного продувочного канала с окном в цилиндре, расположенном напротив выпускного окна. Направление потока свежего заряда в плоскости, проходящей через ось цилиндра вовнутрь симметричной полусферической КС, позволит более полно очистить надпоршневой объем от ОГ.

6. Выводы

В результате проведенных исследований процессов газообмена на двухтактном двигателе с искровым зажиганием по нагрузочной характеристике при $n=3000$ мин⁻¹ получены:

- значения коэффициентов остаточных газов 3D моделированием процессов газообмена (0,17÷0,24) в двигателе с внешним смесеобразованием и симметричной полусферической КС, которые до 3 % отличаются от данных, полученных экспериментальным путем, и согласуются с данными значений известных исследований;

- значения количества свежего заряда в цилиндре двигателя с внутренним смесеобразованием, РТВЗ в полусферической КС, смещенной к выпускному окну путем 3D моделирования процессов газообмена, которые до 7 % отличаются от экспериментальных данных;

- значения количества свежего заряда в цилиндре двигателя с внутренним смесеобразованием, РОТВЗ в симметричной полусферической КС путем 3D моделирования процессов газообмена, которые до 9 % отличаются от экспериментальных данных;

- значения массы продуктов сгорания в цилиндре двигателя при использовании 3D модели, адаптированной к условиям внутреннего смесеобразования с организацией РТВЗ и РОТВЗ, что позволяет рассчитать значения коэффициентов остаточных газов в зависимости от нагрузки;

- диапазон значений коэффициентов остаточных газов при 3D моделировании процессов газообмена в двигателе с внутренним смесеобразованием и РТВЗ изменяется от 0,13 до 0,15, а при организации РОТВЗ – в диапазоне от 0,13 до 0,4, что обусловлено уровнем дросселирования свежего заряда на впуске и конструктивными различиями полусферической камеры сгорания;

- снижение уровня значений коэффициента остаточных газов до 41 % при переходе от внешнего к внутреннему смесеобразованию происходит за счет использования полусферической камеры сгорания.

В качестве рекомендаций по снижению значений коэффициента остаточных газов в двигателе с симметричной КС и организацией РОТВЗ предлагается использовать дополнительный продувочный канал с окном в цилиндре напротив выпускного окна.

Дальнейшие исследования позволяют оценить совершенство организации процессов газообмена по уровню значений коэффициента наполнения (η_v), коэффициента избытка продувочного воздуха (ϕ) и коэффициента утечки рабочего тела (υ).

Литература

1. Грехов, Л. В. Двигатели внутреннего сгорания. Энциклопедия. Том IV-14 [Текст] / Грехов Л. В., Иващенко Н. А., Марков В. А. и др.; под ред. К. В. Фролова, А. А. Александрова и Н. А. Иващенко. – М.: Машиностроение, 2013. – 784 с.
2. Герман, Е. А. Улучшение расходных характеристик газоздушного тракта двухтактного лодочного мотора [Текст]: автореф. дис. ... канд. тех. наук / Е. А. Герман. – М., 2006. – 18 с.
3. Кондрашов, В. М. Двухтактные карбюраторные двигатели [Текст] / В. М. Кондрашов, Ю. С. Григорьев, В. В. Тупов и др. – М.: Машиностроение, 1990. – 272 с.
4. Березин, С. Р. Теория и расчет газодинамических процессов в быстроходном 2-х тактном турбопоршневом двигателе [Текст]: дис. ... д-ра техн. наук / С. Р. Березин. – М., 1994. – 377 с.
5. Blair, G. P. Design and Simulation of Two-Stroke Engines [Text] / G. P. Blair. – Society of Automotive Engineers, 1996. – 623 p.
6. Лобов, Н. В. Использование трехмерных газодинамических моделей для совершенствования конструкции двухтактных двигателей внутреннего сгорания [Текст] / Н. В. Лобов // Ползуновский вестник – 2006. – № 4 – С. 92–97.
7. Isabel, M. Simulation of the Scavenging Process in Two-Stroke Engines [Text] / M. Isabel, L. Galdo, G. Carlos, R. Vidal // Numerical Modelling, 2012. – P. 27–44. doi: 10.5772/37097
8. Mattarelli, E. Advances in The Design of Two-Stroke, High Speed, Compression Ignition Engines [Text] / E. Mattarelli, G. Cantore, C. Alberto // Advances in Internal Combustion Engines and Fuel Technologies, 2013. – P. 149–182. doi: 10.5772/54204
9. Zhang, Y. Lean boost CAI combustion in a 2-stroke poppet valve GDI engine [Text] / Y. Zhang, H. Zhao // Internal Combustion Engines: Performance, Fuel Economy and Emissions, 2013. – P. 169–177. doi: 10.1533/9781782421849.5.169
10. Karunanidhi, S. G. Cfd Studies of Two Stroke Petrol Engine Scavenging [Text] / S. G. Karunanidhi, V. S. Nithin, G. S. Rao // Journal of Engineering Research and Applications. – 2014. – Vol. 4. – P. 74–79.
11. King, J. Multiple Injection and Boosting Benefits for Improved Fuel Consumption on a Spray Guided Direct Injection Gasoline Engine [Text] / J. King, O. Böcker // Proceedings of the FISITA 2012 World Automotive Congress. – 2013 – Vol. I. – P. 229–241. doi: 10.1007/978-3-642-33841-0_18
12. Солодов, В. Г. Научно-прикладной программный комплекс MTFS® для расчета трехмерных вязких турбулентных течений жидкостей и газов в областях произвольной формы. [Текст] / В. Г. Солодов, Ю. В. Стародубцев // Сертификат гос. регистр. авторских прав. – УГААСП. – № 5921. – 16.07.2002.

13. Ероценков, С. А. Определение коэффициента остаточных газов в двухтактном двигателе с искровым зажиганием [Текст] / С. А. Ероценков, В. А. Корогодский, А. А. Хандримайлов, О. В. Василенко // Двигатели внутреннего сгорания. – 2011. – № 2. – С. 13–19.
14. Лебедев, С. Е. Исследование продувки двухтактного двигателя методом газовых анализов [Текст] / С. Е. Лебедев, М. С. Хо-вах // Дизелестроение. – 1940. – № 1, 2.
15. Корогодский, В. А. Повышение топливно-экологических показателей двухтактного ДВС с искровым зажиганием за счет совершенствования процессов внутреннего смесеобразования [Текст] / В. А. Корогодский // Двигатели внутреннего сгорания. – 2013. – № 2. – С. 21–26.

Зростання кількості відходів, що містять кольоро-ві метали, призводить до забруднення навколишнього середовища. Вторинне використання компонентів відходів економічно вигідно не тільки з екологічних позицій. Представлено теоретичне обґрунтування та результати чисельного моделювання розділення відходів кабельно-провідникової продукції у вібраційному пневматичному сепараторі в потоці повітря. Показано, що чисельне комп'ютерне моделювання дозволяє визначити раціональну розпушеність частинок лому в робочому просторі сепаратора, що забезпечує необхідну якість продуктів розділення. Залучення відходів у вторинну переробку дозволить знизити техногенне навантаження на навколишнє природне середовище

Ключові слова: відходи, кабельно-провідникова продукція, компоненти, розділення, повітряна сепарація, чисельне моделювання, розпушеність

Рост количества отходов, содержащих цветные металлы, приводит к загрязнению окружающей среды. Вторичное использование компонентов отходов экономически выгодно не только с экологических позиций. Представлено теоретическое обоснование и результаты численного моделирования разделения отходов кабельно-проводниковой продукции в вибрационном пневматическом сепараторе в потоке воздуха. Показано, что численное компьютерное моделирование позволяет определить рациональную разрыхленность частиц лома в рабочем пространстве сепаратора, обеспечивающую необходимое качество продуктов разделения. Вовлечение отходов во вторичную переработку позволит снизить техногенную нагрузку на окружающую природную среду

Ключевые слова: отходы, кабельно-проводниковая продукция, компоненты, разделение, воздушная сепарация, численное моделирование, разрыхленность

УДК 502.55

DOI: 10.15587/1729-4061.2016.59786

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА СЕПАРАЦИИ ОТХОДОВ КАБЕЛЬНО-ПРОВОДНИКОВОЙ ПРОДУКЦИИ

Е. И. Назимко

Доктор технических наук, профессор*

E-mail: ele-nazimko@ukr.net

С. В. Малько

Кандидат биологических наук, доцент*

E-mail: sergmalko@rambler.ru

А. Ю. Семенова

Ассистент*

E-mail: selivan_anna@mail.ru

*Кафедра «Экология моря»

Федеральное государственное

бюджетное образовательное

учреждение высшего образования

«Керченский государственный морской

технологический университет»

ул. Орджоникидзе, 82, г. Керчь, 298309

1. Введение

Развитие различных отраслей промышленности приводит к нарушению экологической обстановки, особенно в крупных городах и мегаполисах, где антропогенное воздействие сконцентрировано на ограниченной территории и проживает значительная часть населения. Резко увеличившийся рост производства электронной техники в ходе хозяйственной деятельности человечества создал одну из глобальных экологических проблем современности – проблему защиты

окружающей природной среды от негативного воздействия отходов производства и потребления.

Наиболее интенсивно отходы накапливаются в городской среде, несвоевременное удаление и обезвреживание их часто приводят к экологическому кризису. Наличие различных материалов и химических веществ в отходах способствуют загрязнению атмосферного воздуха, почв, поверхностных и грунтовых вод. При этом известно, что многие отходы содержат ценные компоненты, которые могут быть вторичным сырьем для ряда отраслей промышленности. Пробле-