

**Bibliography (transliterated):**

1. Shokotov N.K. Rezul'taty optimizatsii parametrov zikla teplovoznogo dizel'-turbinnoy ustanovki / N.K. Shokotov, A.I. Gubin, Vi. Moroz, Vi.S. Klepanda // Dvigateli vnutrennego sgoraniya: respublikanskiy mejvedomstvennyy nauch.-tehn. sb. – Har'kov: Vicha shkola. – 1980. – № 32. – S. 11-14. 2. Moroz Vi. Matematicheskoe planirovanie issledovaniya pri optimizatsii pokazateley turboporshnevoogo dizelya / Vi. Moroz // Dvigateli vnutrennego sgoraniya: respublikanskiy mejvedomstvennyy nauch.-tehn. sb. – Har'kov: Vicha shkola. – 1976. – № 24. – S. 96-102. 3. Shokotov N.K. Osnovy termodinamicheskoy optimizatsii transportnyh dizeley / Shokotov N.K. – H.: Vicha shk., 1980. – 120 s. 4. Sobol' I.M. Vybor optimal'nykh kriteriev v zadachah so mnogimi parametrami / I.M. Sobol', R.B. Statni-kov. – M.: Nauka, 2005. – 110 s. 5. Vrublevskiy A.N. Metod mnogokriterial'noy

identifikatsii matematicheskoy modeli toplivnoy sistemy / A.N. Vrublevskiy // Avtomobil'nyy transport: sb. nauch. tr. Har'k. naz. avt.-dor. un-ta. – Vyp. 23. – Har'kov, 2008. – S.95-99. 6. Vrublevskiy A.N. Nauchnye osnovy sozdaniya akkumulyatornoy toplivnoy sistemy dlya bystrohodnogo dizelya / Vrublevskiy A.N. – H.: HNADU, 2010. – 216 s. 7. Kanilo P.M. Avtomobil' ta navkolishne seredoviche / Kanilo P.M., Bey I.S., Rovenskiy O.I. – H.: Prapor, 2000. – 304 s. 8. Vibe I.I. Novoe o rabochem zikle dvigateley / I.I. Vibe. – M.: Mashgiz, 1962. – 270 s. 9. Turenko A.N. Avtomatizirovannyy stend dlya issledovaniya i dovodki gazovogo malolitrajnogo bystrohodnogo dvigatelya vnutrennego sgoraniya / A.N. Turenko, F.I. Abramchuk, A.N. Poyda, A.N. Kabanov, A.A. Dzyubenko, A.P. Kuz'menko, G.Vi Maystrenko // Mehanika i mashinostroenie: sb. nauch. tr. – Har'kov: NTU «HPI». – 2010. – № 1. – S. 66-73.

УДК 621.43.003

**С.А. Брощенко, д-р техн. наук, В.А. Корогодский, канд. техн. наук, А.А. Хандримайлов, канд. техн. наук, О.В. Василенко, инж.**

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ОСТАТОЧНЫХ ГАЗОВ В ДВУХТАКТНОМ ДВИГАТЕЛЕ С ИСКРОВОМ ЗАЖИГАНИЕМ

### Введение и постановка проблемы

Двухтактные ДВС с искровым зажиганием (ИЗ) и кривошипно-камерной продувкой являются весьма распространенным типом двигателей. Они имеют ряд преимуществ по сравнению с четырехтактными ДВС, таких как меньшая стоимость производства в связи с отсутствием клапанов газораспределения, большая удельная мощность и меньшие массо-габаритные показатели. Двухтактные ДВС с ИЗ и внешним смесеобразованием (карбюратор) имеют высокий расход топлива и значительные выбросы вредных веществ (ВВ) с отработавшими газами (ОГ). Снижение расхода топлива и уменьшение выбросов ВВ с ОГ возможно получить путем перехода от внешнего смесеобразования к внутреннему, используя непосредственное впрыскивание топлива (НВТ).

Для снижения расхода топлива и уменьшения выбросов ВВ с ОГ необходимо совершенствовать процессы газообмена. Совершенство процессов газообмена определяется следующими интегральными показателями: коэффициент утечки ( $\nu$ ), коэффициент наполнения ( $\eta_{vs}$ ), коэффициент избытка продувочного воздуха ( $\phi_k$ ) и коэффициент остаточных газов ( $\gamma$ ).

Одним из определяющих факторов, характеризующих качество и совершенство протекания процессов газообмена в двухтактных ДВС, является коэффициент остаточных газов ( $\gamma$ ).

### Анализ публикаций

Определение  $\gamma$  возможно путём проведения экспериментальных исследований или путем мате-

матического моделирования. Математическое моделирование предпочтительнее, так как позволяет получить достоверные результаты с меньшими затратами.

В настоящее время исследователями используются программные комплексы, которые позволяют моделировать газодинамические потоки в полостях ДВС. В работе [1] авторы использовали программный комплекс SOLIDWORKS с модулем COSMOS FLOWWORKS, позволяющий моделировать газодинамические процессы. В результате исследований авторы получили значения параметров и скоростей газа в трехмерной модели камеры сгорания двигателя. В работе [2] использовалась специальная программа KIVA-II, позволяющая также проводить трехмерное моделирование газовых потоков в камере сгорания двухтактного двигателя. Авторами были получены значения концентраций газов по объему цилиндра при изменении угла поворота коленчатого вала.

Целью исследований являлось определение коэффициента остаточных газов в двухтактном двигателе с ИЗ, системами внешнего смесеобразования (карбюратор) и внутреннего смесеобразования (НВТ). Значения  $\gamma$  определялись с учетом теплофизических свойств рабочего тела.

Использование трехмерного моделирования газовых течений в полостях двигателя позволяет совершенствовать качество протекания процессов газообмена и предопределяет повышение эффективных показателей ДВС.

### Обработка и анализ экспериментальных данных при моделировании протекания газообмена на такте сжатия

При моделировании учитывались теплофизические свойства рабочего тела такие как: истинная массовая изобарная теплоемкость ( $C_{pm}$ ) на такте сжатия, значения коэффициента утечки ( $\nu$ ), коэффициента избытка воздуха в цилиндре ( $\alpha_u$ ), значения разрежения на впуске ( $\Delta P_s$ ) в зависимости от нагрузки [3,4]. Эти данные были использованы как граничные условия и исходные данные при последующем моделировании процессов газообмена на такте сжатия, что повысило адекватность моделирования.

Экспериментальные исследования проводились на одноцилиндровом двухтактном двигателе ДН-4М (S/D=87/82) с ИЗ, воздушным охлаждением и кривошипно-камерной продувкой производства завода “Гидромаш” (г. Мелитополь) по нагрузочным характеристикам при частоте вращения коленчатого вала  $n=3000$  мин<sup>-1</sup>. Двигатель имеет симметричные фазы газораспределения: начало выпуска 102° после ВМТ, начало продувки 123° после ВМТ.

Анализ проб газа проводился газоанализатором СТ 300.02. с классом точности – 1. Технические возможности газоанализатора позволяют измерить объемные доли следующих газов: O<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub> и C<sub>m</sub>H<sub>n</sub>. Полученные значения концентраций указанных газов позволили рассчитать значения коэффициента остаточных газов по известным методикам [5, 6]. Результаты трехмерного моделирования течений газов в полостях двигателя представлены на рис 2,3.

Для проведения аналитических исследований на базе твердотельной модели двигателя была построена сеточная модель, разделенная на три топологически не связанных между собой части (домена). Первый домен включает в себя пространство цилиндра и камеры сгорания; второй – проточную область выпускного канала; третий – область продувочных каналов и “условную” область кривошипной камеры (рис. 1). Область кривошипной камеры названа “условной”, так как она не отражает внутренней геометрии, а учитывает её действительный объем.

Ячейки сеточной модели приняты в виде гексаэдров. Мощность сетки в исходном состоянии составила ~ 150000 ячеек. Начало расчета соответствует положению поршня в момент открытия вы-

пускного окна. В цилиндре, выпускном канале и кривошипной камере заданы начальные значения давления и температуры, полученные из расчета рабочего процесса двигателя. Начальная скорость потока во всех областях предполагалась равной нулю.

В процессе расчета объем цилиндра и кривошипной камеры изменяется за счет организации движения стенок сеточной модели. Подвижными границами являются поверхность днища поршня и верхняя стенка в кривошипной камере. Их перемещение согласовано с законом движения поршня двигателя. Принцип деформирования сетки по времени основывается на послойном изменении путем сжатия/растяжения, либо объединения/разделения слоев ячеек, прилегающих к подвижной границе.

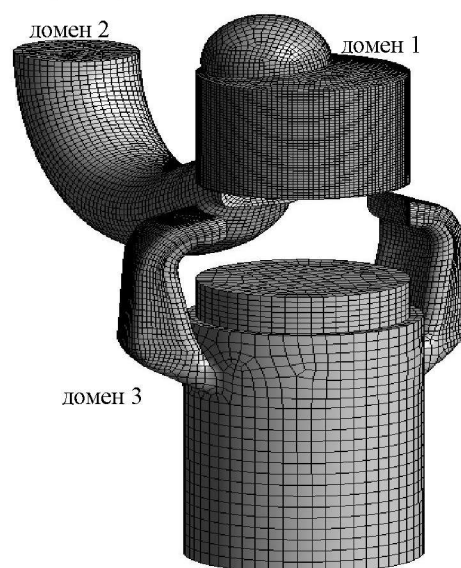


Рис. 1. Сеточная модель расчетной области

Расчетная модель включает несколько интерфейсов – это стенки сеточных доменов, которые назначены проницаемыми в момент перекрытия соответствующих границ расчетной области. Так, в начальный момент времени стенка цилиндра является непроницаемой, однако по мере движения поршня к нижней мертвой точке, часть этой стенки перекрывает входную границу выпускного окна. При этом перекрытые части границ приняты проницаемыми, что позволяет моделировать истечение газа из цилиндра через выпускное окно в выпускной канал. Подобные интерфейсы организованы между цилиндром и двумя продувочными каналами.

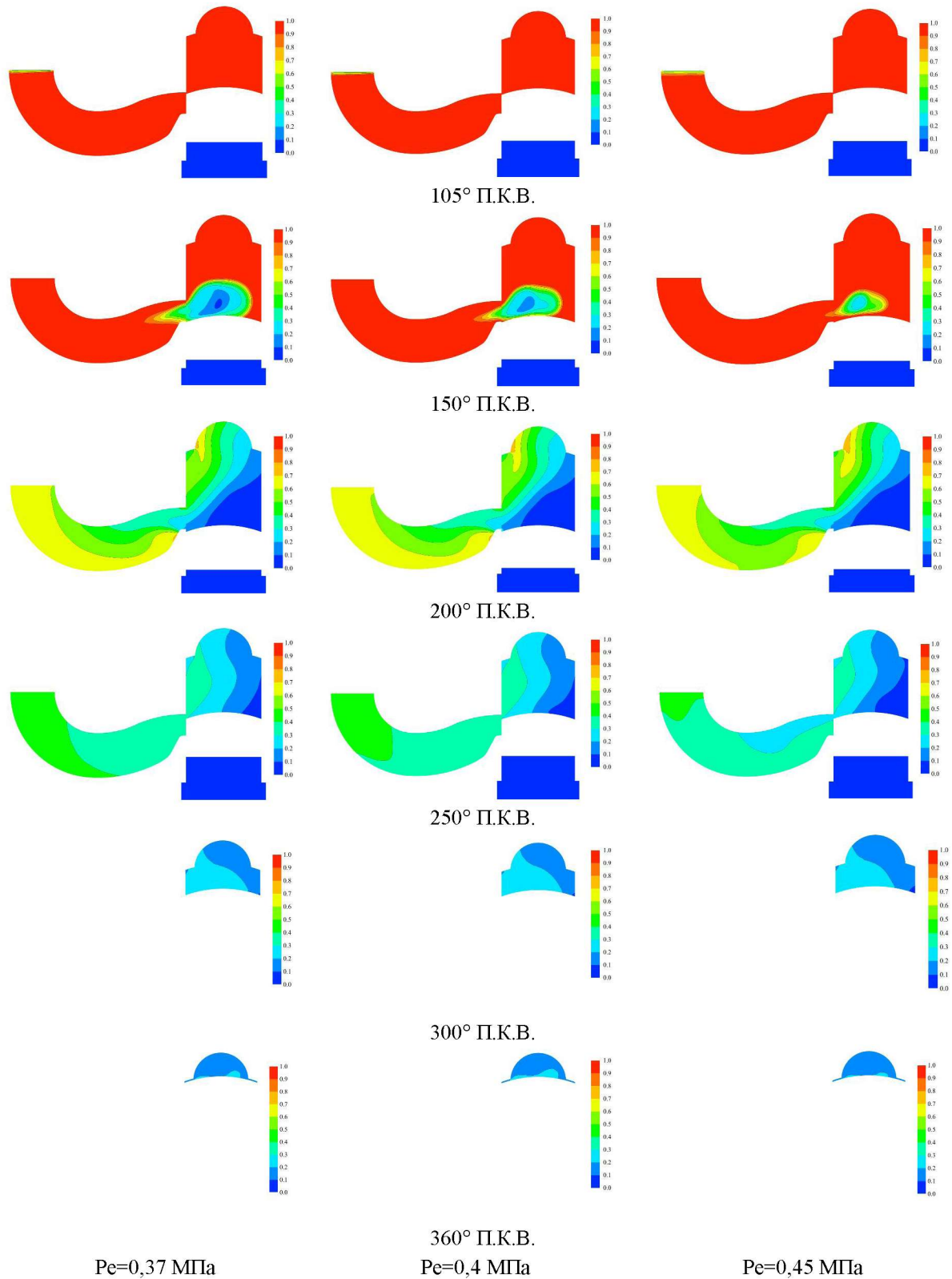


Рис. 2. Изменение концентрации топливоздушного заряда и отработавших газов по углу П.К.В. для карбюраторного двигателя при изменении нагрузки и  $n=3000$  мин<sup>-1</sup>

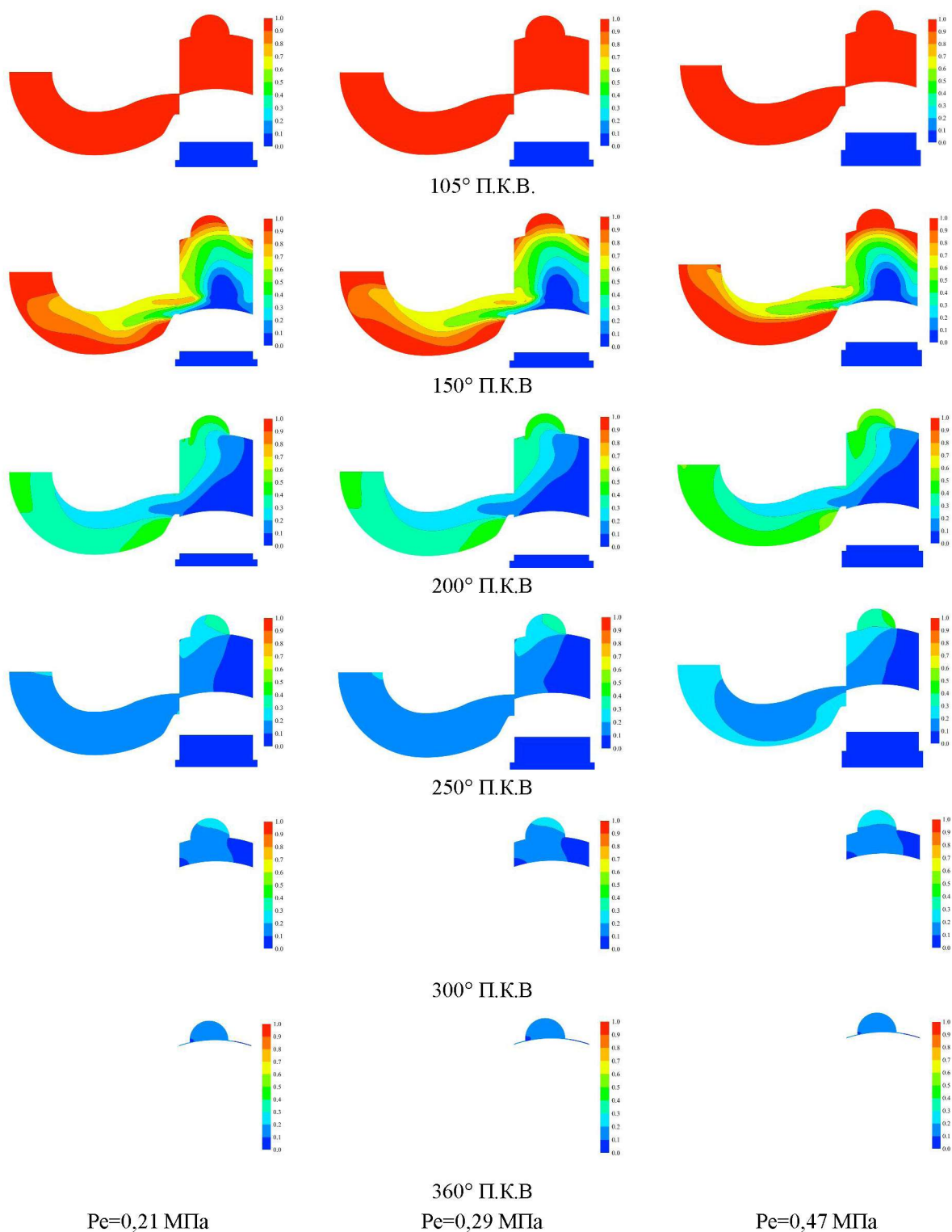


Рис. 3. Изменение концентрации свежего заряда и отработавших газов по углу П.К.В. для двигателя с НВТ при изменении нагрузки и  $n=3000 \text{ мин}^{-1}$

В качестве граничных условий задавались параметры, зависящие от времени, давления и температуры на выходной границе продувочного и выпускного каналов. Эти данные соответствуют результатам экспериментальных исследований [3,4].

Создание сеточной модели, численное моделирование и обработка результатов расчетов выполнены с использованием программного комплекса MTF5® [5]. Солвер для решения уравнений Навье-Стокса использует неявную разностную схему



2-го порядка точности по времени и по пространственным координатам. Турбулентные эффекты описывались при помощи модели турбулентности k-ε. Непроницаемые стенки предполагались адиабатическими. С целью моделирования процесса вытеснения отработавших газов свежим зарядом расчеты проводились для двухкомпонентного газа. В начальный момент времени расчетная область цилиндра и выпускного канала инициализировалась первой компонентой, названной “отработавшие газы”, для которой задавались соответствующие теплофизические свойства. Область продувочных каналов и кривошипной камеры инициализировалась второй компонентой, названной “воздух”. Расчет включал в себя процессы выпуска, продувки и сжатия свежего заряда и остатков продуктов сгорания и завершался в момент достижения границы поршня верхней мертвой точки.

По результатам расчета были получены как численные, так и графические результаты, отображающие изменение концентрации газов в цилиндре

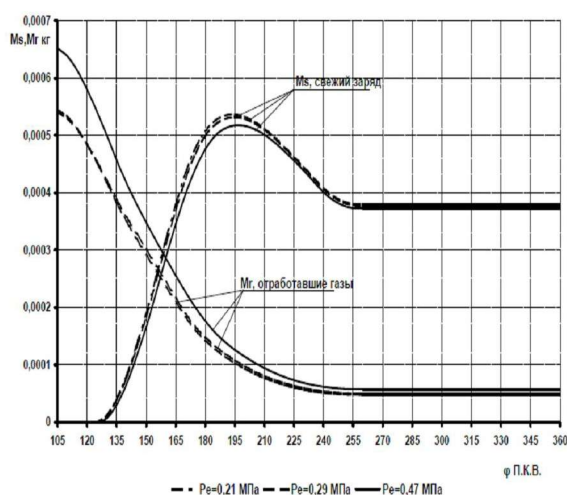


Рис. 4. Изменение массы отработавших газов и свежего заряда в двигателе с карбюратором по углу П.К.В. при  $n=3000 \text{ мин}^{-1}$

Используя полученные данные на рис. 5, 6, можно рассчитать коэффициент остаточных газов  $\gamma$  по известным формулам [6] для двигателя ДН-4М с НВТ и с карбюратором.

Значение коэффициента остаточных газов, полученное путем обработки результатов газового анализа для ДВС с карбюратором составило 23% при  $P_e=0,21 \text{ МПа}$ , с ростом нагрузки до  $P_e=0,45 \text{ МПа}$  значение  $\gamma$  снизилось до 17%.

При определении  $\gamma$  путем трехмерного моделирования газодинамических процессов для ДВС с

двигателя, как с карбюратором, так и с НВТ по углу поворота коленчатого вала при изменении нагрузки и частоте вращения коленчатого вала  $n=3000 \text{ мин}^{-1}$ . Графическая часть представлена на рис. 2,3,4,5. Темным тонам на рис 2,3 соответствует концентрация свежего заряда, а более светлому тону - концентрация отработавших газов. По мере движения поршня от НМТ до ВМТ наблюдается вытеснение и частичное смешивание отработавших газов со свежим зарядом, который поступает из кривошипной камеры в цилиндр, осуществляя продувку и вытеснение отработавших газов.

Полученные поля концентраций позволяют определить распределение  $\gamma$  по объему камеры сгорания двигателя.

Полученные результаты можно представить в виде зависимостей, отображающих изменения концентрации газов (отработавшие газы и воздух для НВТ или отработавшие газы и топливовоздушная смесь для карбюратора) по углу П.К.В. Эти результаты представлены на рис. 4,5.

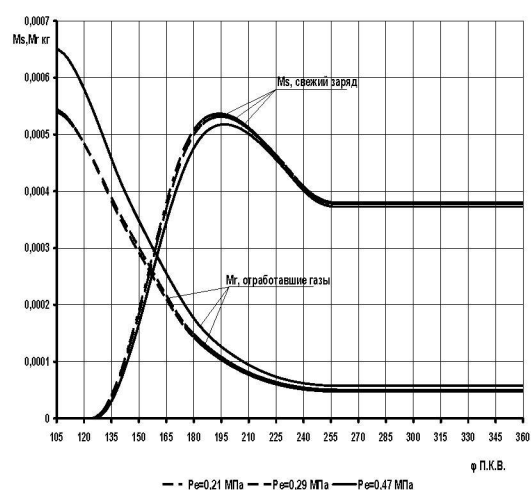


Рис. 5. Изменение массы отработавших газов и свежего заряда в двигателе с НВТ по углу П.К.В. при  $n=3000 \text{ мин}^{-1}$

карбюратором значения  $\gamma$  в цилиндре двигателя изменяются от 23% до 16,4% в диапазоне нагрузок от  $P_e=0,21 \text{ МПа}$  до  $P_e=0,45 \text{ МПа}$ .

При трехмерном моделировании газодинамических процессов в двухтактном двигателе с системой НВТ были определены значения  $\gamma$  в цилиндре двигателя, которые изменяются от 11,6% до 13% в диапазоне нагрузок от  $P_e=0,21 \text{ МПа}$  до  $P_e=0,47 \text{ МПа}$ .

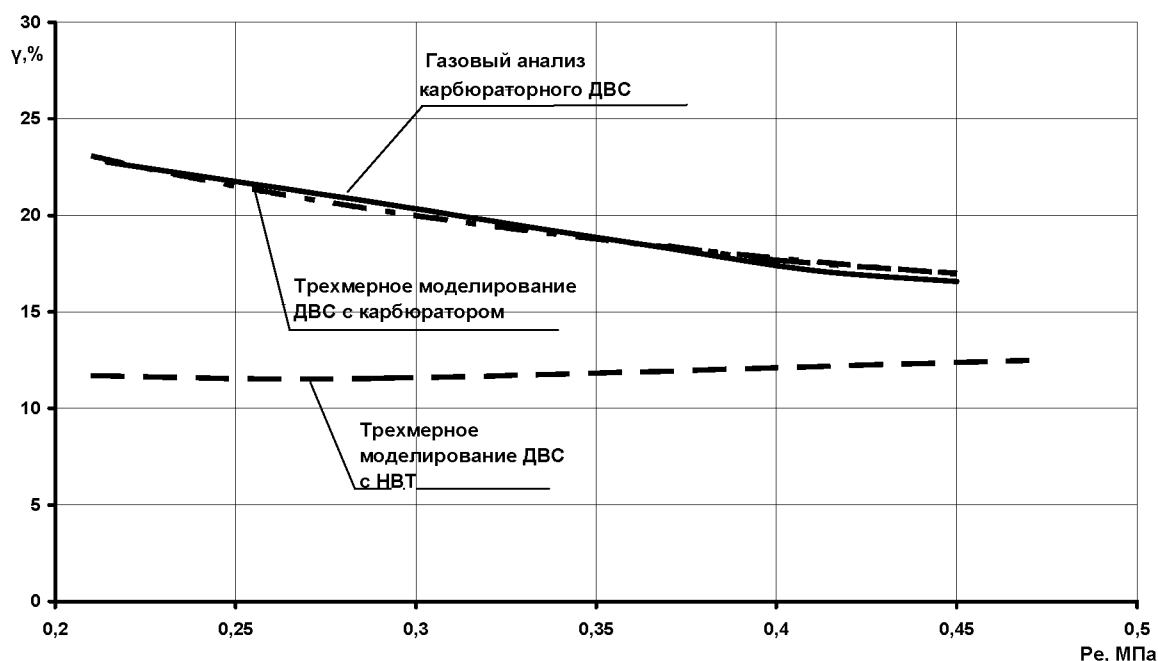


Рис. 6. Значения коэффициента остаточных газов ( $\gamma$ ) для двигателя ДН-4М в зависимости от нагрузки при  $n=3000 \text{ мин}^{-1}$

#### Выводы:

1. Определены значения коэффициента остаточных газов в цилиндре двухтактного двигателя с карбюраторной системой питания методом отбора проб газов непосредственно из цилиндра двигателя и из его выпускной системы на такте сжатия. Значения  $\gamma$  в цилиндре двигателя изменяются от 23% до 17% в диапазоне нагрузок от  $P_e=0,21$  МПа до  $P_e=0,45$  МПа. Получена аппроксимирующая зависимость  $\gamma$  по данным эксперимента для карбюраторного двигателя ДН-4М по нагрузочным характеристикам  $n=3000 \text{ мин}^{-1}$  ( $\gamma = 30,21e^{-1,3447 \cdot P_e}$ ).

2. Определены значения коэффициента остаточных газов в двухтактном двигателе с карбюраторной системой питания методом трехмерного моделирования газодинамических процессов, которые протекают в цилиндре и системах впуска и выпуска. Значения  $\gamma$  в цилиндре двигателя изменяются от 23% до 16,4% в диапазоне нагрузок от  $P_e=0,21$  МПа до  $P_e=0,45$  МПа. Получена аппроксимирующая зависимость  $\gamma$  при трехмерном моделировании процессов газообмена для двигателя ДН-4М ( $\gamma = 12,284 \cdot P_e^{-0,4042}$ ).

3. Полученные результаты значений коэффициента остаточных газов при трехмерном моделировании имеют относительную максимальную погрешность 2,47% относительно данных проведенного газового анализа, который не превышает максимальную допустимую погрешность в 5%.

4. В связи с тем, что разработанная математическая модель двигателя с карбюраторной системой питания показывает результаты, которые совпадают с высокой точностью с полученными экспериментальными данными, то следует предположить, что данная модель будет работать и на двигателе с НВТ.

5. Методом трехмерного моделирования газодинамических процессов в двухтактном двигателе, которые протекают в цилиндре и системах впуска и выпуска при применении системы НВТ, определены значения коэффициента остаточных газов  $\gamma$  в цилиндре двигателя от 11,6% до 13% в диапазоне нагрузок от  $P_e=0,21$  МПа до  $P_e=0,47$  МПа. Получена аппроксимирующая зависимость  $\gamma$  для двигателя ДН-4М с системой НВТ

$$(\gamma = 25,495 \cdot P_e^2 - 14,265 \cdot P_e + 13,553).$$

#### Список литературы:

1. Rosli Abu Bakar. Effects of port sizes in scavenging on new two-stroke engine using numerical analysis / Rosli Abu Bakar, Devarajan Ramasamy, Chiew Chen Wee // Automotive Development Centre, University Teknologi Malaysia - 2009 . 2. Semin. In-Cylinder Flow through Piston-Port Engines Modeling using Dynamic Mesh / Semin, N.M.I.N. Ibrahim, Rosli A. Bakar and Abdul R. Ismail // Journal of Applied Sciences Research. - 2008. - 4(1).- 58-64. 3. Ероценков С.А. Определение теплофизических свойств рабочего тела на такте сжатия для двухтактного двигателя / С.А. Ероценков, В.А. Корогодский, О.В. Василенко // Двигатели внутреннего сгорания. Всеукраинский научно-технический журнал. - 2009 - Вып. №1. - С.35-37. 4. Еро-

ценков С.А. Влияние коэффициента избытка воздуха и степени сжатия на термический КПД двигателя с искровым зажиганием / С.А. Ероценков, В.А. Корогодский, А.А. Каграманян, О.В. Василенко // Двигатели внутреннего сгорания. Всеукраинский научно-технический журнал. – 2008 – Вып.№1. – С.15-21. 5. Солодов В.Г. Научно-прикладной программный комплекс MTFSS® для расчета трехмерных вязких турбулентных течений жидкостей и газов в областях произвольной формы. / В.Г. Солодов, Ю.В. Стародубцев // Сертификат гос. регистр. авторских прав. - УГААСП. - №5921. - 16.07.2002. 6. Дьяченко В.Г. Теория двигателей внутреннего сгорания. [Учебник] / Василий Григорьевич Дьяченко.- Х.: ХНАДУ, 2009.-500 с.

#### **Bibliography (transliterated):**

1.Rosli Abu Bakar. Effects of port sizes in scavenging on new two-stroke engine using numerical analysis / Rosli Abu Bakar, Devarajan Ramasamy, Chiew Chen Wee // Automotive Development Centre,

University Teknologi Malaysia - 2009 .2. Semin. In-Cylinder Flow through Piston-Port Engines Modeling using Dynamic Mesh / Semin, N.M.I.N. Ibrahim, Rosli A. Bakar and Abdul R. Ismail // Journal of Applied Sciences Research. – 2008.- 4(1).- 58-64.3. Erowenkov S.A. Opredelenie teplofizicheskikh svojstv rabocheho tela na takte szhatija dlja dvuhtaktnogo dvigatelja / S.A. Erowenkov, V.A. Korogodskij, O.V. Vasilenko // Dvigateli vnutrennego sgoranija. Vseukrainskij nauchno-tehnicheskij zhurnal. – 2009 – Вып.№1.-S.35-37. 4. Erowenkov S.A. Vlijanie koeficienta izbytko vozduha i stepeni szhatija na termicheskij KPD dvigatelja s iskrovym zazhiganiem / S.A. Erowenkov, V.A. Korogodskij, A.A. Kagramanjan, O.V. Vasilenko // Dvigateli vnutrennego sgoranija. Vseukrainskij nauchno-tehnicheskij zhurnal. – 2008 – Вып.№1.-S.15-21. 5. Solodov V.G. Nauchno-prikladnoj programmnij kompleks MTFSS® dlja rascheta trehmernyh vijazkih turbulentnyh techenij zhidkostej i gazov v oblastjah proizvol'noj formy. / V.G Solodov, Ju.V. Starodubcev // Sertifikat gos. registr. avtorskih prav. - UGAASP. - №5921. - 16.07.2002. 6. D'jachenko V.G. Teorija dvigatel'ej vnutrennego sgoranija. [Uchebnik] / Vasilij Grigor'evich D'jachenko.- H.:HNADU, 2009.-500 s.

УДК 621.43.016

**А.В. Тринева, канд. техн. наук, В.Т. Коваленко, канд. техн. наук,  
С.В. Обозный, инж., А.Н. Клименко, магистр**

## **ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ЛОКАЛЬНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ГОЛОВКИ ЦИЛИНДРОВ ДИЗЕЛЯ КАМАЗ В БЕЗМОТОРНОМ ЭКСПЕРИМЕНТЕ**

### **Введение**

На кафедре ДВС НТУ «ХПИ» накоплен значительный опыт в проведении моторных и безмоторных экспериментов, связанных с оценкой эффективности систем локального воздушного охлаждения (ЛВО) теплонапряженных деталей клапанного узла (выпускной клапан, седло клапана) и зоны межклапанной перемычки головки цилиндров (ГЦ) быстроходных дизелей семейства СМД. Получаемые при этом результаты термометрии указанных элементов имеют определяющее значение при разработке математических моделей (ММ) теплонапряженного состояния (ТНС) в плане их уточнения и задания адекватных граничных условий (ГУ) для задач теплопроводности и механики. Представляет, на наш взгляд, теоретический и практический интерес сравнительная оценка влияния теплофизических свойств материала ГЦ на ее тепловое состояние при использовании ЛВО. Свойства серых чугунов и литейных алюминиевых сплавов, как основных материалов для изготовления блочных и индивидуальных ГЦ, имеют существенные различия по теплофизическим свойствам в рабочем диапазоне температур. При этом алюминиевые сплавы имеют значительно большие значения коэффициентов теплопроводности (для сплавов АЛ и АК  $\lambda = 160 - 170$  Вт/(м·К), для чугунов

$\lambda = 40 - 55$  Вт/(м·К)), что безусловно сказывается как на температурном поле самой детали, так и на протекании теплообменных процессов в основных сопряжениях седло-клапан, седло-головка.

В статье анализируются результаты безмоторного эксперимента с моделированием ЛВО индивидуальной ГЦ дизеля КамАЗ-740 (8Ч12/12) при эксплуатационных температурах дизеля.

На основе критериальных уравнений теории подобия были также рассчитаны оценочные значения коэффициентов теплоотдачи в зонах локального охлаждения с учетом режимных и конструктивных параметров, уточнены ГУ задачи теплопроводности для клапанного узла дизеля КамАЗ. Полученные МКЭ-расчетом температурные поля деталей клапанного узла дали удовлетворительное совпадение с экспериментальными значениями. По результатам безмоторного эксперимента были определены энергетические затраты на прокачку охлаждающего воздуха в системе ЛВО индивидуальной ГЦ дизеля.

### **Анализ публикаций**

Преимущества безмоторных экспериментов, а также основные положения методики проведения таких экспериментов применительно к ГЦ, включающим элементы с ЛВО, проанализированы и сформулированы в работе [1]. При проведении ис-