

## ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ДВИГАТЕЛИ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

УДК 621.432.4

## ОЦЕНКА ПОКАЗАТЕЛЕЙ ГАЗООБМЕНА ПРИ 3D-МОДЕЛИРОВАНИИ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ДВУХТАКТНОГО БЕНЗИНОВОГО ДВИГАТЕЛЯ

**В.А. Корогодский, доц., к.т.н., Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет, Е.П. Воропаев, начальник отдела перспективных разработок и расчетов, АО «Мотор Сич», г. Запорожье**

*Аннотация.* С помощью 3D-моделирования рабочего процесса двухтактного двигателя с искровым зажиганием, кривошипно-камерной продувкой и карбюраторной системой питания на режимах внешней скоростной характеристики оценены показатели газообмена. Результаты моделирования согласуются с экспериментальными данными и результатами 3D-моделирования в программных комплексах AVL FIRE и MTF5®.

*Ключевые слова:* моделирование рабочего процесса двигателя, показатели газообмена.

## ОЦІНКА ПОКАЗНИКІВ ГАЗООБМІНУ ПРИ 3D-МОДЕЛЮВАННІ РАБОЧОГО ПРОЦЕСУ ДВОТАКТНОГО БЕНЗИНОВОГО ДВИГУНА

**В.А. Корогодський, доц., к.т.н., Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Є.П. Воропаєв, начальник відділу перспективних розробок і розрахунків, АТ «Мотор Січ», м. Запоріжжя**

*Анотація.* За допомогою 3D-модельовання робочого процесу двотактного двигуна з іскровим запалюванням, кривошипно-камерною продувкою і карбюраторною системою живлення на режимах зовнішньої швидкісної характеристики оцінено показники газообміну. Результати модельовання узгоджуються з експериментальними даними і результатами 3D-модельовання у програмних комплексах AVL FIRE і MTF5®.

*Ключові слова:* модельовання робочого процесу двигуна, показники газообміну.

## ESTIMATION OF GAS EXCHANGE INDICATORS AT 3-D MODELING OF THE WORKING PROCESS OF THE TWO-STROKE PETROL ENGINE

**V. Korohodskyi, Assoc. Prof., Ph. D. (Eng.), Kharkov National Automobile and Highway University, Ye. Voropayev, Head of Advanced Development and Calculation Department, «Motor Sich» JSC, Zaporizhia**

*Abstract.* With the help of 3-D modeling of the workflow of a two-stroke engine with spark ignition, crank-chamber scavenging and a carburetor feeding system in the modes of external speed characteristic the indices of gas exchange were evaluated. The simulation results are consistent with the experimental data and 3D simulation results in the AVL FIRE and MTF5® software complexes. The model allows performing optimized calculations of multiphase flow in ICE during experimental design work.

*Key words:* modeling of engine process, gas exchange performance, multiphase flow.

**Введение**

Моделирование рабочего процесса двигателя внутреннего сгорания (ДВС) является обще-

признанным способом при разработке и доводке конструктивных особенностей двигателя с целью получения высоких эффективных показателей и выполнения современных

требований по выбросам вредных веществ (ВВ) с отработавшими газами (ОГ) в атмосферу. Применение надежных методов расчета позволяет существенно сократить трудоемкий и дорогостоящий эксперимент, заменить его исследованиями на физических и математических моделях с использованием методов компьютерной оптимизации, что в настоящее время является актуальным и оправданным.

Применение 3D-мерных газодинамических моделей при проектировании ДВС позволяет получить местные значения параметров, векторов скорости и концентрации газовых составляющих рабочего тела, а также оценить их тенденцию изменения в полостях двигателя по времени. При этом данные расчета позволяют близко к реальным условиям оценить местный характер протекания процессов газообмена, смесеобразования и сгорания в ДВС, что является продуктивным инструментом для оптимизации конструктивных особенностей и определения рациональных регулировочных параметров двигателя.

Поэтому перспективным и актуальным является применение 3D-мерных газодинамических моделей при доводке процессов газообмена в бензиновых двухтактных двигателях с искровым зажиганием и кривошипно-камерной продувкой.

#### Цель и постановка задачи

При протекании процессов газообмена в двухтактных двигателях с искровым зажиганием удаление ОГ из цилиндра происходит путем вытеснения входящего в него свежего заряда, который частично перемешивается с остатками продуктов сгорания, что приводит к повышению коэффициента остаточных газов ( $\gamma$ ), снижению коэффициента наполнения ( $\eta_v$ ) и мощности двигателя. В двигателях же с кривошипно-камерной продувкой это обстоятельство еще усугубляется низким коэффициентом избытка продувочного свежего заряда ( $\phi$ ), пониженной энергией заряда и нерациональными фазами газораспределения. Использование внешнего смесеобразования (например, карбюраторной системы питания) в двухтактном двигателе с искровым зажиганием дополнительно предопределяет еще и потерю части топливовоздушной смеси в выпускную систему при продувке цилиндра, что значительно снижает экономические и экологические показатели двигателя.

Для оптимизации конструктивных особенностей газоздушного тракта с целью повышения показателей газообмена поставлены задачи по моделированию рабочего процесса ДВС с помощью газодинамической модели.

Весь газоздушный тракт двигателя был разбит на ряд зон: полость воздушного фильтра, впускной коллектор с обратным пластинчатым клапаном, кривошипная камера, надпоршневая полость, настроенный участок выпускной системы и глушитель.

Для достоверности результаты расчетов необходимо сравнить с экспериментальными данными, что позволит оценить адекватность моделирования рабочего процесса двигателя с внешним смесеобразованием.

Для решения поставленных задач предлагается газодинамическая модель двухтактного двигателя с искровым зажиганием и кривошипно-камерной продувкой. К модели и ее программной реализации предъявляются следующие основные требования: 1) газодинамическая модель должна быть трёхмерной; 2) модель должна иметь возможность выполнять расчет многофазного течения; 3) необходимо выполнять расчет замкнутого рабочего цикла; 4) модель и ее программная реализация должны быть ориентированы на применение обычных ПЭВМ, а скорость счета должна позволять выполнять оптимизационные расчеты двигателя в рамках опытно-конструкторских работ.

#### Анализ публикаций

Сложность системы дифференциальных уравнений газовой динамики в большинстве случаев затрудняет ее аналитическое решение. Для этого разработаны специальные численные методы, ориентированные на применение высокоскоростных вычислительных машин [1].

Для построения математической модели можно выделить четыре основных метода решения дифференциальных уравнений: метод характеристик, метод распада произвольного разрыва (РПР), метод контрольных объемов (МКО) и метод крупных частиц (МКЧ). Краткая характеристика этих методов следующая.

Метод характеристик (и ему подобные методы) [1] имеет давнюю историю. Он был предложен еще до появления первых компьютеров, и для простых задач расчет мог выполняться (в принципе) даже на калькуляторах. Но этот метод не является универсальным и удобным. В его алгоритме используется неявная схема, с предварительным выделением особенностей. Метод характеристик позволяет точно определить положение вторичных волн, однако в задачах со сложной волновой структурой и геометрией каналов возникают затруднения. Метод характеристик также не приспособлен для расчета многофазных течений.

Известна математическая модель двухтактного двигателя с кривошипно-камерной продувкой [2], построенная на основных принципах метода характеристик. Однако в этой модели течения внутри цилиндра не моделировались, а в каналах – были одномерными. На базе метода характеристик можно построить трехмерную модель, но этот метод довольно сложен даже для одномерной постановки, а для многомерной схемы он практически не рационален.

Рассмотрим метод распада произвольного разрыва [3]. В этом методе выполняется точное решение задачи о распаде произвольного разрыва газодинамических параметров. Метод РПР более универсален, чем метод характеристик. Он позволяет решать многомерные задачи и согласовывать одномерные и многомерные модели.

Однако у метода РПР есть и недостатки. В структуре его алгоритма имеются итерационные процедуры, которые существенно снижают скорость счета (ориентировочно – в 5–15 раз по сравнению с МКЧ). Этот метод также мало приспособлен к моделированию многофазных течений.

Метод контрольных объемов является на сегодняшний день одним из самых совершенных методов. Он позволяет моделировать течения с различной интенсивностью разрывов, моделировать пограничный слой, крупно- и мелкомасштабную турбулентность. Его рабочее тело – вязкий теплопроводный многокомпонентный газ. Однако этот метод на несколько порядков сложнее, чем МКЧ, чрезвычайно требователен к ресурсам ЭВМ и имеет очень низкую относительную скорость

счета. Применение современных ПЭВМ не позволяет успешно применять его для опытно-конструкторских работ.

В публикации [4] предложена численная модель трехмерного вязкого турбулентного течения газа в элементах впускных и выпускных трактов, камерах сгорания и цилиндрах поршневых двигателей на тактах впуска и сжатия. В основу этой модели положен метод контрольных объемов. Потенциальные возможности данной модели позволяют решить поставленную выше задачу в полном объеме, однако это потребует применения специального мощного компьютера и, тем не менее, время расчета будет исчисляться неделями. К тому же, насколько можно судить из этой и других публикаций, авторы сами не ставят перед собой такую задачу, а больше останавливаются на тщательном моделировании отдельных элементов газоздушного тракта, при этом не рассматривают всю систему впуска и выпуска в целом. Не реализован в этой модели также и расчет замкнутого рабочего цикла.

Известен также МКЧ [5]. Этот метод, так же, как и РПР и МКО, относится к методам сквозного счета, без предварительного выделения особенностей. Однако в основе МКЧ имеется возможность распределения по физическим процессам исходного оператора на более простые действия, что позволяет построить безытерационный алгоритм и тем самым значительно повысить скорость счета. Этот метод нетребователен также и к объему используемой оперативной памяти ЭВМ. МКЧ – наиболее простой для понимания и освоения. Метод крупных частиц позволяет моделировать многофазные газодинамические течения. Но и у метода крупных частиц есть свой серьезный недостаток – классическая схема МКЧ неустойчива в большинстве случаев. Это сопряжено прежде всего с тем, что в методе отсутствует физическая вязкость газа – только схемная. Из чего следует второй недостаток – недостаточная точность моделирования вихревых течений.

Однако положительные качества метода имеют превалирующую привлекательность для решения практических задач. Этому способствует еще и гибкость самого метода – он легко модифицируется и может включать в себя элементы других методов [6].

На основании анализа различных методов интегрирования уравнений газовой динамики предпочтение было отдано методу крупных частиц.

### Математическая модель

В качестве исходной системы дифференциальных уравнений газодинамической модели была использована система уравнений Эйлера, записанная в дивергентном виде для трехмерной постановки [5]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho W) &= 0, \\ \frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho v W) + \frac{\partial p}{\partial x} &= 0, \\ \frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho v W) + \frac{\partial p}{\partial y} &= 0, \\ \frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \omega W) + \frac{\partial p}{\partial z} &= 0, \\ \frac{\partial(\rho E)}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho E W) + \operatorname{div}(p W) &= Q_{\text{СТ}} + Q_{\text{ТО}}, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $Q_{\text{СТ}}$  – теплота, выделившаяся при сгорании топлива;  $Q_{\text{ТО}}$  – теплота, привнесенная вследствие теплообмена со стенками.

Приведенная система уравнений не является полностью закрытой. Для ее замыкания используется уравнение состояния идеального газа

$$p = (k - 1) \cdot \rho \cdot \left( E - \frac{W^2}{2} \right), \quad (2)$$

где  $E$  – полная удельная энергия.

Как уже было сказано выше, для интегрирования этой системы уравнений используется метод крупных частиц.

Устойчивость счета обеспечивается применением на эйлеровом этапе формулы [6]

$$\bar{v}_{i+0,5,j,k}^n = (1 - A) \cdot v_{i+0,5,j,k}^n + \tilde{v}_{i+0,5,j,k}^{n-1} \cdot A, \quad (3)$$

где  $A$  – коэффициент, влияющий на уровень аппроксимационной вязкости схемы (при  $A = 0$  конечно-разностные аналоги уравнений приобретают классическую форму метода

крупных частиц);  $v_{i+0,5,j,k}^n$  – скорректированная компонента скорости, используемая на эйлеровом этапе;  $v_{i+0,5,j,k}^n$  – компонента скорости, вычисленная по скоростям заключительного этапа на предыдущем шаге;  $\tilde{v}_{i+0,5,j,k}^{n-1}$  – компонента скорости, взятая из предыдущего эйлерова этапа.

Рабочая среда состоит из трех компонентов: воздух, топливные пары и ОГ. В данной модели применена гипотеза мгновенного перемешивания в ячейке, обоснованная Ю.М. Давыдовым [7], поэтому учет концентраций компонентов сводится к таким формулам:

$$g = G_{\text{В}} / G; \quad b = G_{\text{Т}} / G, \quad (4)$$

где  $g$  и  $b$  – массовые доли в ячейке воздуха и топлива соответственно.

Теплоемкость (и газовая постоянная тоже) смеси газов вычисляется соответственно по формуле

$$c = c_{\text{В}} \cdot g + c_{\text{Т}} \cdot b + c_{\text{ОГ}} \cdot (1 - g - b). \quad (5)$$

Для расчета процесса сгорания используется уравнение Вибе И.И. [8].

Расчет теплообмена осуществляется по формуле Ньютона [9], примененной к каждой ячейке отдельно. Граничные условия при этом можно задавать как на границе рабочей среды со стенками полости, так и на границе внешней стенки с охлаждающей средой.

В газодинамической модели применены следующие допущения: 1) газ – нетеплопроводный, вязкость газа – аппроксимационная; 2) пограничный слой не моделируется. Для решения поставленных задач принятие этих допущений – оправдано и необходимо.

В рассматриваемой трехмерной газодинамической модели весь газоздушный тракт двигателя, вместе с цилиндрами и кривошипными камерами, представлен как единая система. Во всех участках расчетной области счет ведется по единому алгоритму. В конкретной программной реализации этой модели заложена возможность расчета двигателя с числом цилиндров до трёх. Этот параметр выбран из соображений обеспечения быстрой работы программы и практической целесообразности.

В модели применена декартова система координат. В качестве варианта рассматривалось использование цилиндрической системы координат (которая традиционно используется для цилиндров ДВС). Однако увеличивающиеся в размерах к периферии ячейки не позволяют достаточно точно и адекватно формировать расчетную сетку в продувочных каналах. Формирование же в продувочных каналах другой сетки потребует последующей их «сшивки», что будет нарушать единообразие расчетной сетки. С другой стороны, размер расчетной ячейки в 1 мм при диаметре цилиндра 82 мм – уже достаточно мал и позволяет аппроксимировать реальную геометрию с достаточной точностью. Кроме этого, при выборе системы координат желательным моментом является размещение граней ячейки перпендикулярно движению среды. Однако для вихревого движения среды, которое имеет место в процессе газообмена в цилиндре, цилиндрическая и декартова система координат не имеют друг перед другом каких-либо ощутимых преимуществ.

Использованием системы дробных ячеек [7] в модели реализовано непрерывное движение поршня по расчетной сетке. Это также позволило, независимо от дискретности расчетной сетки, в каждый момент углового положения коленчатого вала устанавливать площади проходных сечений открытых окон, соответствующие конструкции реального двигателя. Это положение относится как к надпоршневой области, так и к подпоршневой (включая нижнюю кромку юбки поршня, которая управляет открытием-закрытием впускного окна).

Трехмерная расчетная область повторяет конфигурацию всего газоздушного тракта и включает в себя все его участки: полость воздушного фильтра, впускной патрубков, обратный пластинчатый клапан, кривошипную камеру, перепускные каналы, цилиндр, настроенную выпускную трубу, глушитель (рис. 1).

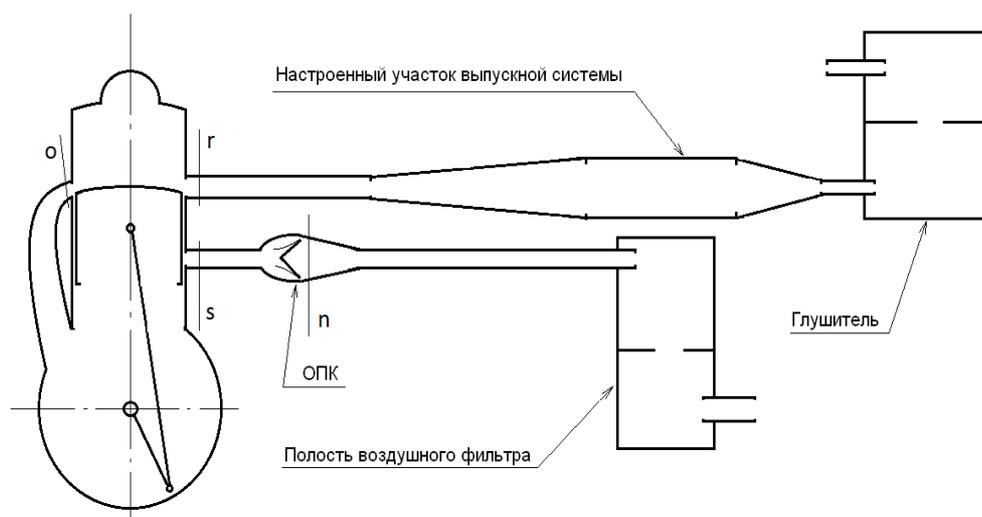


Рис. 1. Схема расчетных областей двухтактного двигателя

Емкость расчетной сетки газоздушного тракта моделируемого двигателя ДН-4 составила более 5 млн ячеек. Время расчета одного рабочего цикла при частоте вращения коленчатого вала  $n = 5000 \text{ мин}^{-1}$  составило 14 ч.

В программе реализован расчет замкнутого рабочего цикла с выходом на повторяемость рабочих циклов. Эта способность предоставляет три положительных качества.

Во-первых, расчет замкнутого рабочего цикла позволяет вычислить все интегральные

параметры, которые можно сравнивать с результатами натурных испытаний.

Во-вторых, это полностью снимает влияние ошибки в задании начальных условий на результаты моделирования. Согласно опыту выполнения расчетов, можно задать начальные параметры, соответствующие атмосферным условиям, и, тем не менее, модель все равно, сделав 5–7 полных оборотов коленчатого вала, выйдет на повторяемость циклов. Это будет означать равенство начальных и конечных интегральных параметров и равен-

ство параметров в ячейках в соответствующие моменты времени в сравнении с предыдущим циклом.

В-третьих, выход на повторяемость рабочих циклов косвенно служит подтверждением отсутствия математических ошибок, связанных с реализацией алгоритма расчета в конкретной прикладной программе.

Для расчета рабочего процесса бензинового двухтактного двигателя с искровым зажиганием, кривошипно-камерной продувкой и внешним смесеобразованием создана 3D-мерная газодинамическая модель на языке программирования C++, что позволяет выполнить расчет многофазного течения в полостях двигателя за полный рабочий цикл. Модель и программа ориентированы на применение в обычной ПЭВМ; скорость счета позволяет выполнять оптимизационные расчеты рабочих процессов ДВС в опытно-конструкторских работах.

### Результаты исследований

Исследования двигателя ДН-4 с карбюраторной системой питания проводились на режимах внешней скоростной характеристики.

Для наглядной демонстрации результатов расчета при 3D-моделировании процессов газообмена представлена визуализация полей скорости рабочего тела в рабочих полостях двухтактного двигателя: в цилиндре и выпускной системе (рис. 2); в продувочных каналах и цилиндре (рис. 3); в продувочных окнах, цилиндре и выпускной системе (рис. 4).

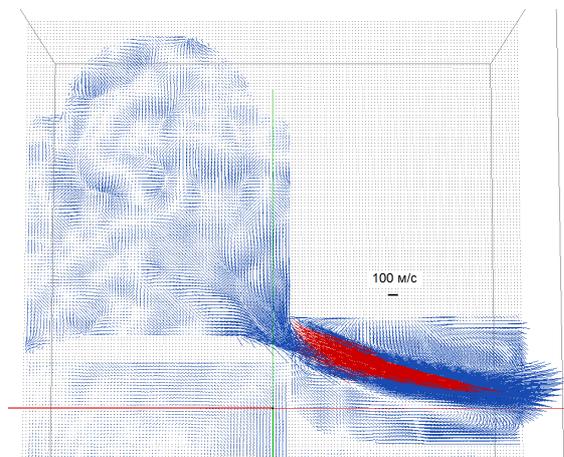


Рис. 2. Поле скоростей рабочего тела в цилиндре и глушителе при газообмене (продольное сечение цилиндра)

На рисунках (рис. 2–4) видны характерные вихреобразования и направления потоков рабочего тела при протекании процесса газообмена в момент одновременного открытия продувочных окон и выпускного окна ДВС.

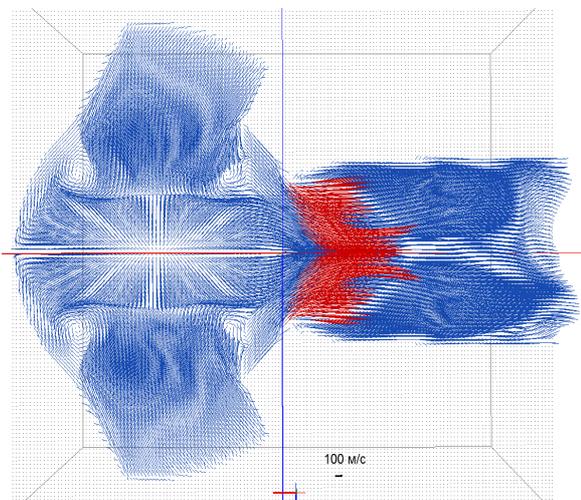


Рис. 3. Поле скоростей рабочего тела в продувочных окнах, цилиндре и глушителе при газообмене (сечение по выпускному и продувочным окнам)

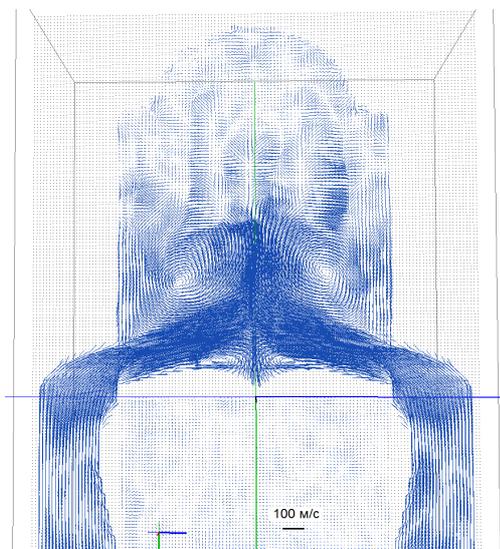


Рис. 4. Поле скоростей рабочего тела в продувочных каналах и цилиндре при газообмене (поперечное сечение)

По данным моделирования рабочего процесса двигателя ДН-4 с карбюраторной системой питания на режимах внешней скоростной характеристики представлены результаты пяти режимов ( $n = 1931, 2987, 3901, 4433, 4993 \text{ мин}^{-1}$ ) в виде развернутых индикаторных диаграмм по углу поворота коленчатого вала ( $\varphi$ , п.к.в.) (рис. 5–9).

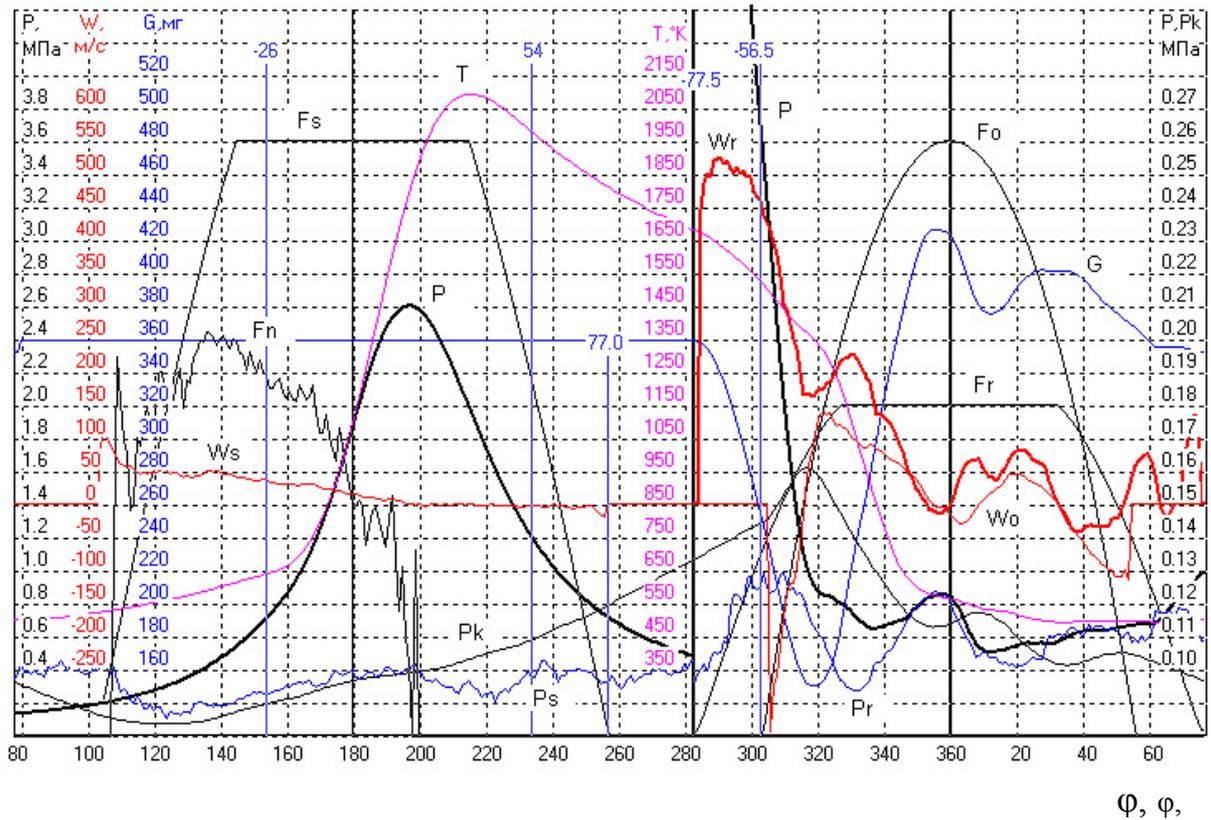


Рис. 5. Результаты моделирования рабочего процесса ( $n = 1931 \text{ мин}^{-1}$ )

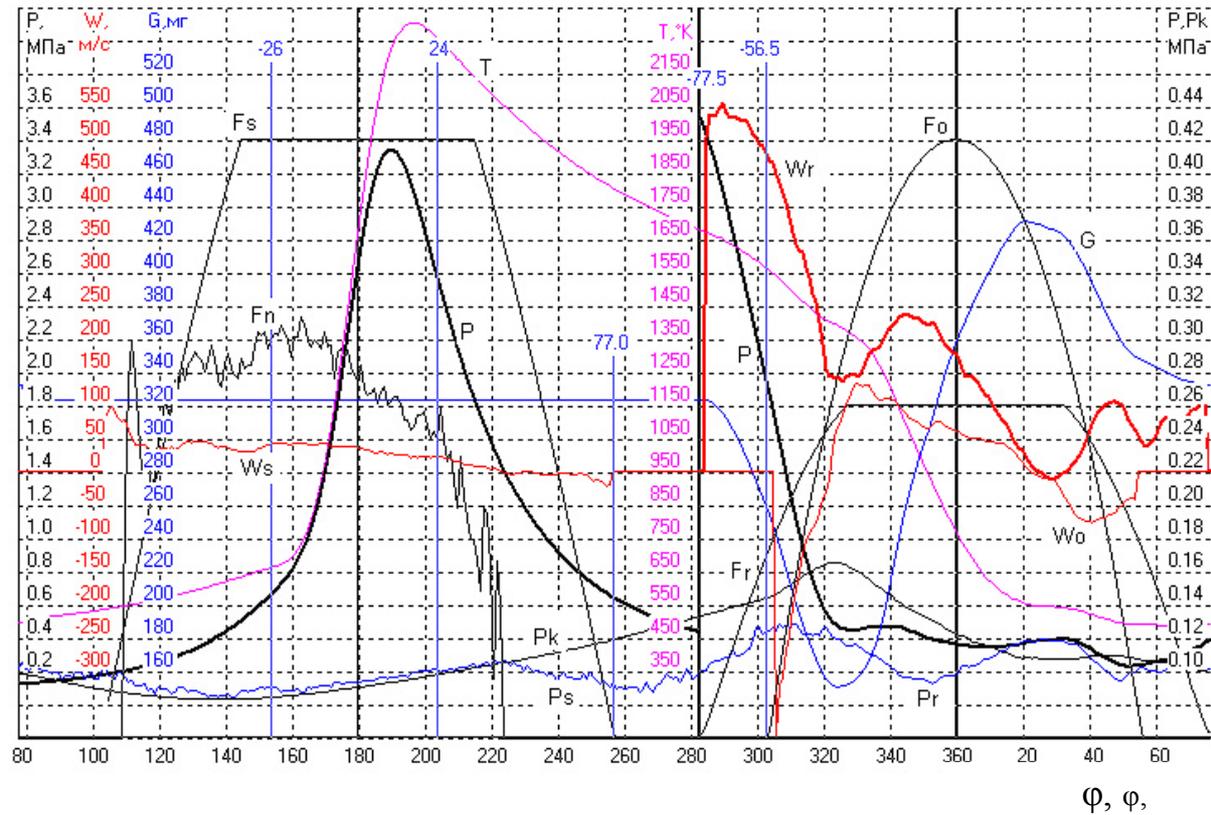


Рис. 6. Результаты моделирования рабочего процесса ( $n = 2987 \text{ мин}^{-1}$ )

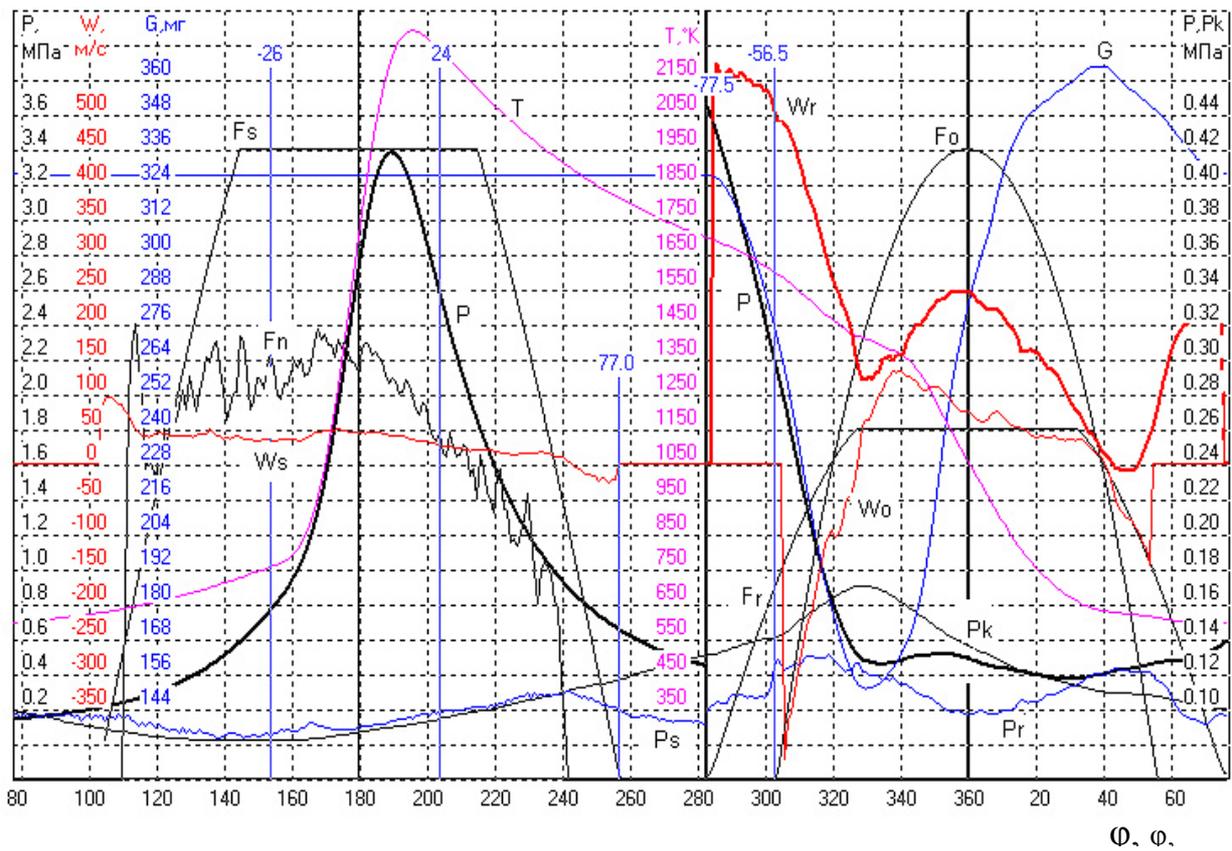


Рис. 7. Результаты моделирования рабочего процесса ( $n = 3901 \text{ мин}^{-1}$ )

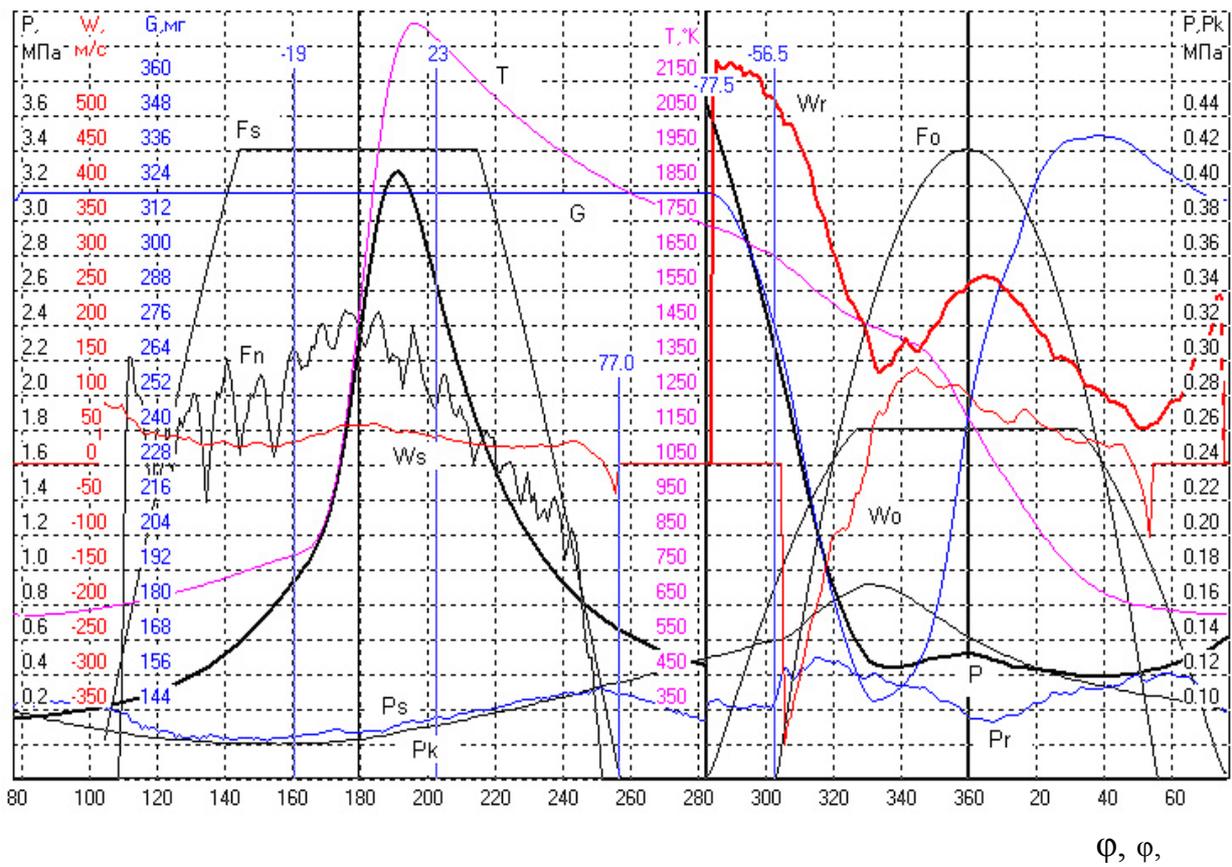
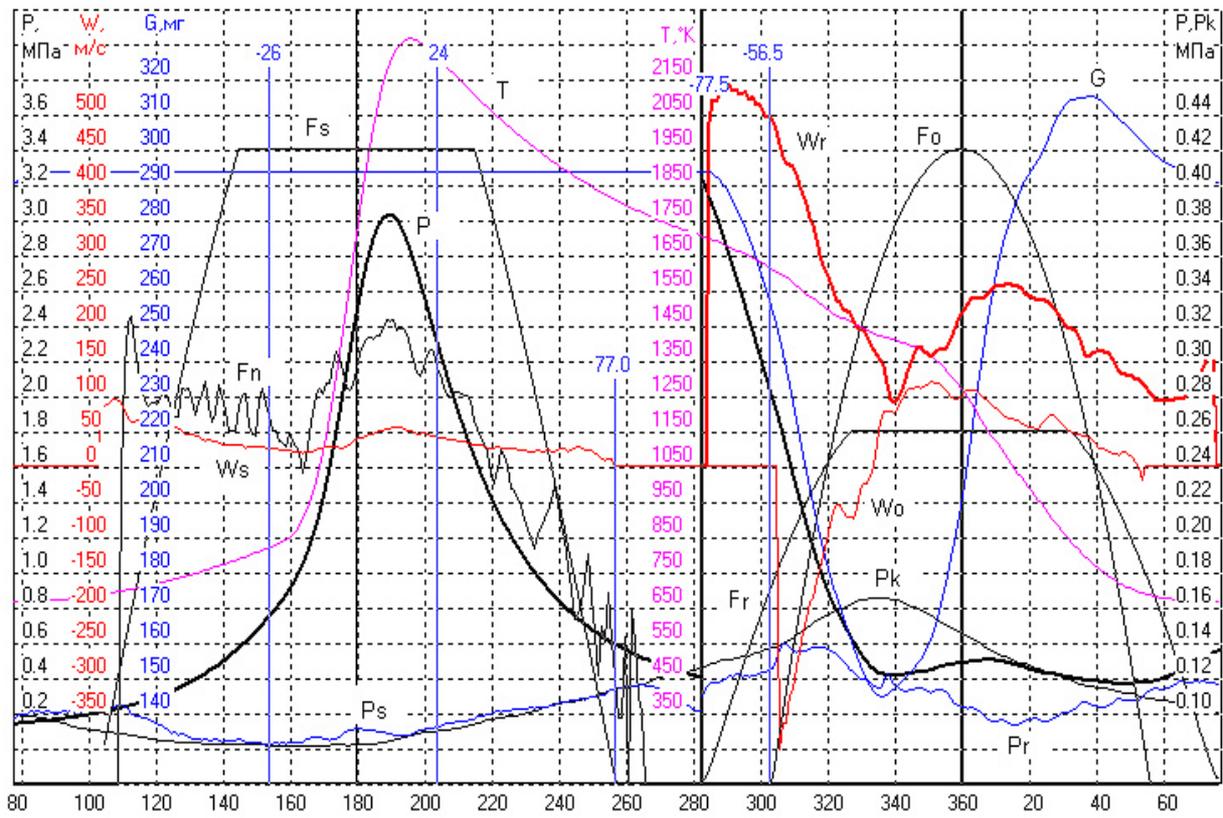
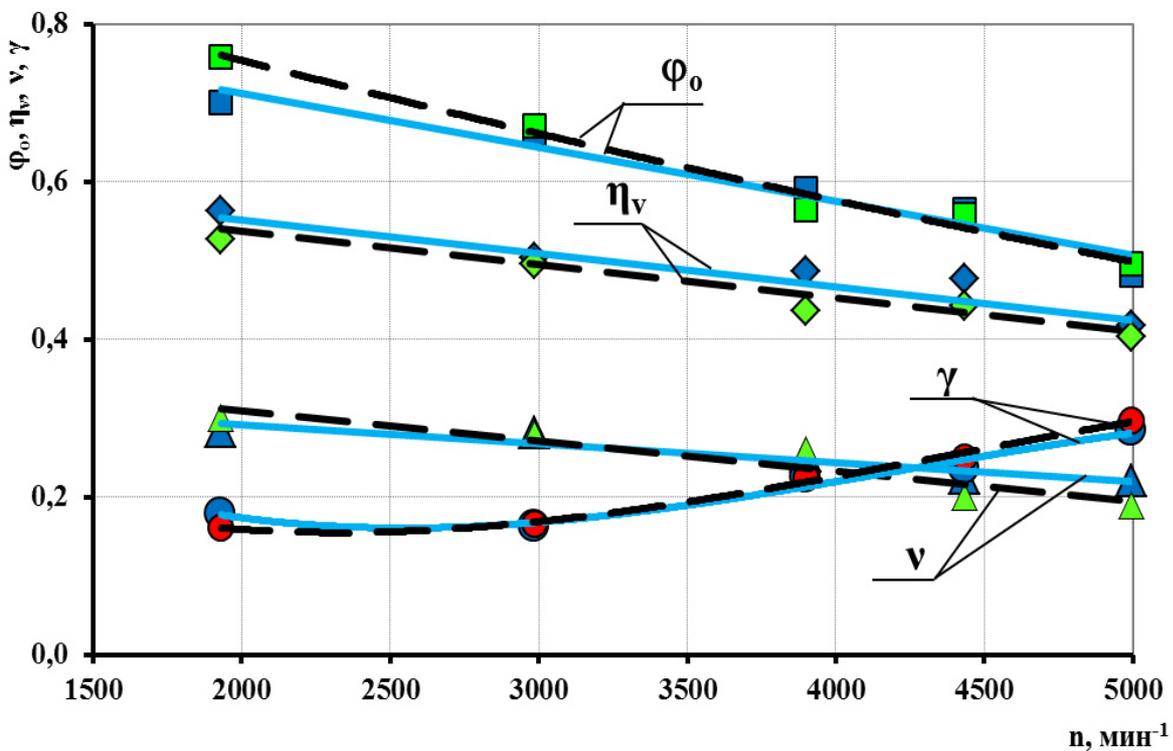


Рис. 8. Результаты моделирования рабочего процесса ( $n = 4433 \text{ мин}^{-1}$ )



$\phi, \varphi,$

Рис. 9. Результаты моделирования рабочего процесса ( $n = 4993 \text{ мин}^{-1}$ )



■  $\phi$  - расч. ■  $\phi$  - эксп. ▲  $v$  - расч. ▲  $v$  - эксп. ◆  $\eta_v$  - расч. ◆  $\eta_v$  - эксп. ●  $\gamma$  - расч. ●  $\gamma$  - эксп.

Рис. 10. Сравнение экспериментальных и расчетных значений показателей газообмена:  $\phi_0, \eta_v, \gamma$  и  $v$  двигателя ДН-4 с карбюраторной системой питания по внешней скоростной характеристике

Индикаторные диаграммы представлены таким образом, чтобы можно было детально рассмотреть протекание рабочего процесса в целом во всех полостях работающего двухтактного двигателя с искровым зажиганием, кривошипно-камерной продувкой и резонансным глушителем на выпуске. В двухтактном двигателе рабочий цикл осуществляется за один поворот коленчатого вала. При перемещении поршня в цилиндре от ВМТ (на рис. 5–9 обозначено  $\varphi = 180$  град. п.к.в.) до НМТ (на рис. 5–9 обозначено  $\varphi = 360$  или  $0$  град. п.к.в.) после сгорания во время расширения газов открывается сначала выпускное окно ( $\varphi = 282,5$  град. п.к.в.), а затем – продувочные окна ( $\varphi = 303,5$  град. п.к.в.). Поскольку в конструкции двигателя открытие и закрытие выпускного и продувочных окон осуществляется при помощи поршня, то фазы газораспределения расположены симметрично относительно ВМТ и НМТ; соответственно при движении поршня на такте сжатия от НМТ до ВМТ продувочные окна закрываются при  $\varphi = 56,5$  град. п.к.в., а выпускное окно – при  $\varphi = 77,5$  град. п.к.в. Во впускной системе двигателя установлен обратный пластинчатый клапан (ОПК), поэтому начало поступления свежего заряда в кривошипную камеру осуществляется при создании разряжения в ней во время перемещения поршня от НМТ к ВМТ.

Закрытие обратного пластинчатого клапана происходит также автоматически при повышении давления в кривошипной камере выше атмосферного давления во время движения поршня от ВМТ к НМТ.

На всех диаграммах представленные кривые соответствуют следующим обозначениям:  $p$  – давление, МПа;  $T$  – температура, К;  $G$  – масса рабочего тела в цилиндре двигателя, мг;  $p_k$  – давление в кривошипной камере, МПа;  $p_s$  – давление перед ОПК, МПа;  $p_r$  – давление за выпускным окном, МПа;  $F_n$ ,  $F_s$ ,  $F_o$ ,  $F_r$  – проходные сечения ОПК, впускного окна, продувочных и выпускных окон соответственно,  $\text{м}^2$ ;  $W_s$ ,  $W_o$ ,  $W_r$  – скорости рабочего тела в сечениях соответствующих окон, м/с (рис. 5–9). Проведено сравнение значений показателей газообмена, полученных при 3D-моделировании и экспериментальных исследованиях (рис. 10).

Качество организации процесса газообмена в двухтактном ДВС с кривошипно-камерной

продувкой и использованием резонансного глушителя на выпуске в основном зависит от созданных условий на впуске, в кривошипной камере, в цилиндре и глушителе при одновременном открытии органов газораспределения между ними. При этом в зависимости от частоты вращения коленчатого вала и нагрузки двигателя на наполнение кривошипной камеры влияет соотношение между проходным сечением впускного канала и его длиной.

При низких частотах вращения коленчатого вала желательно иметь меньшее сечение при длинном впускном тракте, а при повышенных частотах вращения коленчатого вала – большее сечение при короткой длине впускного тракта.

На частичных нагрузках также имеет значение гидравлическое сопротивление, создаваемое дросселем на впуске. Уменьшение дросселирования поступающего свежего заряда на впуске способствует увеличению наполнения кривошипной камеры. При этом объем кривошипной камеры влияет на интенсивность поступления свежего заряда в цилиндр двигателя при продувке.

Давление газов в цилиндре при открытии выпускного окна влияет на скорость истечения газов в выпускную систему. Настроенная резонансная система выпуска для улучшения очистки цилиндра от ОГ имеет возле выпускного окна диффузор, способствующий повышению скорости истечения газов из цилиндра.

Для возвращения в цилиндр части свежего заряда, потерянного в выпускную систему при продувке, в резонансном глушителе предусмотрен конфузор, позволяющий направить отраженную газовую волну обратно к выпускному окну.

Таким образом, настроенная выпускная резонансная система предназначена для обеспечения пониженного давления перед выпускным окном во время его открытия и повышенного давления – к моменту его закрытия. Согласование соответствующих газодинамических течений рабочего тела в полостях двухтактного ДВС от впускного до выпускного тракта способствует повышению очистки цилиндра от ОГ и наполнению его

свежим зарядом, что влияет на технико-экономические показатели ДВС.

Анализ изменения индикаторных диаграмм по углу поворота коленчатого вала позволяет сделать вывод, что при повышении частоты вращения коленчатого вала характер перемещения газовых волн во впускной ( $p_s$ ) и выпускной ( $p_r$ ) системах существенно изменяется. Во впускной системе момент закрытия ОПК ( $F_n$ ) изменяется с 200 до 265 град. п.к.в. при повышении частоты вращения коленчатого вала двигателя  $n$  с 1931 до 4993 мин<sup>-1</sup>. Увеличение продолжительности фазы впуска способствует повышению наполнения кривошипной камеры и повышению давления в ней при движении поршня от ВМТ до НМТ. В выпускной системе перемещение отраженной волны от конфузора в направлении выпускного окна приводит к возвращению части потерянного заряда при продувке обратно в цилиндр, что вызывает повышение давления в цилиндре и резкое снижение скорости ( $W_o$ ) поступления свежей ТВС из кривошипной камеры в цилиндр двигателя. Результаты расчета также показывают, что на всех представленных режимах работы двигателя имеет место заброс продуктов сгорания в кривошипную камеру в начале протекания процесса продувки. Отмеченный характер течения рабочего тела в полостях двигателя и в выпускной системе во время осуществления процесса газообмена согласуется с данными, полученными при эксперименте, и результатами 3D-моделирования в программном комплексе *AVL FIRE* [10].

Полученные результаты расчета при 3D-моделировании на основе метода МКЧ и экспериментальные данные на режимах внешней скоростной характеристики двухтактного двигателя ДН-4 с карбюраторной системой питания сравниваются по значениям показателей газообмена: коэффициента избытка продувочного воздуха  $\phi_o$ , коэффициента наполнения  $\eta_v$ , коэффициента остаточных газов  $\gamma$  и коэффициента утечки продувочного воздуха  $\nu$  (рис. 10).

При повышении частоты вращения коленчатого вала двигателя ДН-4 с 1931 до 4993 мин<sup>-1</sup> значения показателей газообмена:  $\phi_o$ ,  $\eta_v$  и  $\nu$  – снижаются, а  $\gamma$  – возрастает.

Расчетные значения  $\phi_o$  находятся в диапазоне от 0,7 до 0,482, максимальное отличие

от экспериментальных данных до 7,8 % наблюдается при минимальной частоте вращения коленчатого вала, с повышением частоты вращения отличие сокращается до 2,4 %.

При повышении частоты вращения коленчатого вала результаты  $\eta_v$  изменяются от 0,56 до 0,425 и в среднем отличаются от экспериментальных данных на 1,8 %.

Значения  $\nu$ , определенные при расчете, снижаются от 0,283 до 0,22, причем при минимальной частоте вращения коленчатого вала на 5,7 % уровень экспериментальных значений  $\nu$  ниже, а при максимальной частоте вращения – на 13,6 % выше.

Результаты расчета  $\gamma$  при 3D-моделировании процессов газообмена с повышением частоты вращения коленчатого вала изменяются от 0,178 до 0,284. Максимальное расхождение значений  $\gamma$  (до 10 %) между экспериментальными и расчетными данными, определенными по МКЧ, наблюдается при минимальной частоте вращения коленчатого вала  $n = 1931$  мин<sup>-1</sup>, с повышением  $n$  до 4993 мин<sup>-1</sup> отличие в значениях  $\gamma$  составляет 4,38 %.

Расчетное значение  $\gamma = 0,163$  на режиме максимальной нагрузки при  $n = 3000$  мин<sup>-1</sup> в результате 3D-моделирования на основе метода МКЧ отличается от данных эксперимента ( $\gamma = 0,166$ ) на 1,81 % и согласуется с результатом расчета ( $\gamma = 0,17$ ) [11], полученным при 3D-моделировании в программном комплексе *MTFS*<sup>®</sup> на рассматриваемом режиме работы двигателя [12].

Снижение значений показателей газообмена –  $\phi_o$ ,  $\eta_v$  и  $\nu$  – с повышением частоты вращения коленчатого вала согласуется с повышением уровня остатков ПС в цилиндре двигателя и повышением значений коэффициента остаточных газов  $\gamma$ , что объясняется сокращением времени на протекание процессов газообмена.

## Выводы

Уровень значений показателей газообмена при 3D-моделировании рабочего процесса двухтактного двигателя с искровым зажиганием, кривошипно-камерной продувкой и карбюраторной системой питания на режимах внешней скоростной характеристики, полученных с использованием метода круп-

ных частиц, отличается от экспериментальных данных. Отличие в значениях коэффициента избытка продувочного воздуха  $\phi_0$  – до 7,8 %; коэффициента наполнения  $\eta_v$  – в среднем на 1,8 %; коэффициента утечки продувочного воздуха  $\nu$  – до 13,6 %; коэффициента остаточных газов  $\gamma$  – до 10 %.

Характер, направление и интенсивность движения рабочего тела в рабочих полостях двигателя и в выпускной системе при протекании процесса газообмена согласуется с данными, полученными при эксперименте, и результатами 3D-моделирования в программных комплексах *AVL FIRE* и *MTFS*<sup>®</sup>.

3D-мерная газодинамическая модель на базе метода крупных частиц с использованием обычной ПЭВМ и языка программирования C++ позволяет выполнять оптимизационные расчеты многофазного течения в рабочих полостях ДВС.

### Литература

1. Круглов М.Г. Газовая динамика комбинированных двигателей внутреннего сгорания: учеб. пособие / М.Г. Круглов, А.А. Меднов. – М.: Машиностроение, 1988. – 360 с.
2. Кондрашов В.М. Двухтактные карбюраторные двигатели внутреннего сгорания / В.М. Кондрашов, Ю.С. Григорьев, В.В. Тулов и др. – М.: Машиностроение, 1990. – 272 с.
3. Годунов С.К. Численное решение многомерных задач газовой динамики / С.К. Годунов, А.В. Забродин, М.Я. Иванов и др. – М.: Наука, 1976. – 400 с.
4. Солодов В.Г. Численная модель сжимаемого вязкого турбулентного течения во впускных каналах и цилиндрах поршневых двигателей. Часть 1. Численный метод / В.Г. Солодов, А.А. Хандримайлов // Двигатели внутреннего сгорания. – 2009. – №1. – С. 37–41.
5. Белоцерковский О.М. Метод крупных частиц в газовой динамике / О.М. Белоцерковский, Ю.М. Давыдов. – М.: Наука, 1982. – 392 с.
6. Августининович В.Г. Численное моделирование нестационарных явлений в газотурбинных двигателях: научное издание / В.Г. Августининович, Ю.Н. Шмотин и др. – М.: Машиностроение, 2005. – 536 с.

7. Давыдов Ю.М. Численное исследование течений в двигателях внутреннего сгорания методом крупных частиц / Ю.М. Давыдов, М.Г. Круглов, А.А. Меднов, В.А. Нефедов. – М.: Вычислительный центр АН СССР, 1983. – 60 с.
8. Вибе И.И. Новое о рабочем цикле двигателей / И.И. Вибе. – М.–Свердловск: Машгиз, 1962. – 272 с.
9. Двигатели внутреннего сгорания: Теория поршневых и комбинированных двигателей / под ред. А.С. Орлина, М.Г. Круглова. – М.: Машиностроение, 1983. – 372 с.
10. Грайворонский Е.С. Моделирование процесса газообмена двухтактного двигателя в среде AVL FIRE / Е.С. Грайворонский, О.М. Врублевский, В.А. Корогодский // Збірник наукових праць української державної академії залізничного транспорту. – 2012. – Вип. 134. – С. 71–78.
11. Корогодский В.А. Исследование влияния типа смесеобразования и формы камеры сгорания на значения коэффициента остаточных газов / В.А. Корогодский, А.А. Хандримайлов, О.Н. Стеценко // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2016. – 1/5 (79). – С. 4–12.
12. Солодов В. Г. Научно-прикладной программный комплекс *MTFS*<sup>®</sup> 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.

### References

1. Kruglov M.G., Mednov A.A. *Gazovaya dinamika kombinirovannykh dvigateley vnutrennego sgoraniya: Ucheb. posobie* [Gas dynamics of combined internal combustion engines], Moscow, Mashinostroenie Publ., 1988, 360 p.
2. Kondrashov V.M., Grigor'ev Yu.S., Tupov V.V. *Dvukhtaktnye karbyuratornye dvigateli vnutrennego sgoraniya* [Two-stroke carburettor internal combustion engines], Moscow, Mashinostroenie Publ., 1990, 272 p.
3. Godunov S.K., Zabrodin A.V., Ivanov M.Ya., Krayko A.N., Prokopov G.P. *Chislennoe reshenie mnogo-mernykh zadach gazovoy dinamiki* [Numerical solution of multidimensional problems of gas dynamics], Moscow, Nauka, 1976, 400 p.

- mensional problems of gas dynamics], Moscow, Nauka Publ., 1976, 400 p.
4. Solodov V.G., Khandrimaylov A.A. *Chislennaya model' szhimae-mogo vyazkogo turbulentnogo techeniya vo vpu-sknykh kanalakh i tsilindrakh porshnevykh dvigateley. Chast'1. Chislennyy metod* [Numerical model of compressible viscous turbulent flow in inlet valves and cylinders of reciprocating engines. Part 1. Numerical method] *Dvigateli vnutrennego sgoraniya* [Internal combustion engines]. 2009, no.1, pp. 37–41.
  5. Belotserkovskiy O.M., Davydov Yu.M. *Metod krupnykh chastits v gazovoy dinamike* [The method of large particles in gas dynamics], Moscow, Nauka Publ., 1982, 392 p.
  6. Avgustinovich V.G., Shmotin Yu.N. *Chislennoe modelirovanie nestatsionarnykh yavleniy v gazotur-binykh dvigatelyakh: Nauchnoe izdanie.* [Numerical simulation of non-stationary phenomena in gas turbine engines: Scientific publication]. Moscow, Mashinostroenie Publ, 2005, 536 p.
  7. Davydov Yu.M., Kruglov M.G., Mednov A.A., Nefedov N.A. *Chislennoe issledovanie techeniy v dvigatelyakh vnutrennego sgoraniya metodom krupnykh chastits* [Numerical investigation of flows in internal combustion engines using the large-particle method], Moscow, Vychislitel'nyy tsentr AN SSSR Publ., 1983, 60 p.
  8. Vibe I.I. *Novoe o rabochem tsikle dvigateley* [Novelty concerning the working cycle of engines], Moscow, Sverdlovsk, Mashgiz Publ., 1962, 272 p.
  9. *Dvigateli vnutrennego sgoraniya: Teoriya porshnevykh i kombinirovannykh dvigateley* Pod redaksiey A.S. Orlina, M.G. Kruglova [Internal combustion engines: Theory of reciprocating and combined engines], Moscow, Mashinostroenie Publ., 1983, 372 p.
  10. Grayvoronskiy Ye.S., Vrublevs'kiy O.M., Korogodskiy V.A. *Modelirovanie protsessy gazoobmena dvukhtaktnogo dvigatelya v srede AVL FIRE* [Simulation of the gas exchange of a two-stroke engine in the AVL FIRE environment]. *Zbirnik naukovikh prats' ukrains'koi derzha-vnoi akademii zaliznichnogo transportu* [Collection of scientific works of the Ukrainian State Academy of Rail-Road Transport], 2012, vol. 134, pp. 71–78.
  11. Korogodskiy V.A., Khandrimaylov A.A., Stetsenko O.N. *Issledovanie vliya-niya tipa smeseobrazovaniya i formy kamery sgoraniya na znacheniya koeffitsienta ostatochnykh gazov* [Investigation of influence of the type of mixture formation and the shape of combustion chamber on the value of residual gas Coefficient]. *Vostochno-evropeyskiy zhurnal peredovykh tekhnologiy* [Eagtern European Journal of Advanced Technology], 2016, vol. 1/5 (79), pp. 4–12.
  12. Solodov V. G., Starodubtsev Yu.V. *Nauchno-prikladnoy programmnyy kompleks MTFS® dlya rascheta trekhmernykh vyazkikh turbulentnykh techeniy zhidkostey i gazov v oblastiakh proizvol'noy formy* [Scientific and Applied software complex MTFS for calculation of thee – dimensional viscous turbulent flows of liquids and gases in arbitrary – shaped regions]. *Sertifikat gos. registr. avtorskikh prav.* [Certificate of state registration of copyrights]. – UGAASP, №5921, 16.07.2002.
- Рецензент: Ф.И. Абрамчук, профессор, д. т. н., ХНАДУ.
-