

## О ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ СТАТИЧЕСКОЙ ПРОДУВКИ ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМЫ ГАЗООБМЕНА ВОЗДУХОМ ПРИ МАТЕМАТИЧЕСКОМ МОДЕЛИРОВАНИИ ДВОЙНОГО ВЫПУСКА ОТРАБОТАВШИХ ГАЗОВ ДВИГАТЕЛЯ С ОКНОМ В ГИЛЬЗЕ

Балашов А.А., Свистула А.Е., Яковлев С.В.

*В работе сделан анализ правомерности использования статической продувки воздухом основных элементов газоздушных трактов для математической модели двигателя с окном в гильзе (ДОГ).*

*Ключевые слова: двигатель, двигатель с окном в гильзе, статическая продувка, газообмен, математическое моделирование, двойной выпуск продуктов сгорания.*

### Введение

Разработка новых термодинамических циклов поршневых двигателей внутреннего сгорания (ПДВС) или создание новых способов их работы преследует, как правило, увеличение литровой мощности и улучшение экологичности или снижение токсичности отработавших газов (ОГ), а может быть и то и другое вместе. Поэтому критерием новых разработок является эксперимент, который далеко не всегда можно быстро осуществить или из-за финансовых возможностей или из-за технических трудностей или из-за каких-то других препятствий. Поэтому, прежде чем поставить эксперимент, желательно было-бы выполнить расчет, который бы отражал бы сущность явлений происходящих в предлагаемых новых разработках, т.е. создать математическую модель отражающую, в максимально возможной степени, сущность происходящих процессов [1, 5].

Однако теоретические методы описания сущности явлений и процессов базируются на тех или иных допущениях и предположениях, являющихся весьма приближенными и требуют для повышения точности, проводимых с их помощью расчетов, знание величин и коэффициентов, которые могут быть получены только опытным путем на натуральных образцах или их моделях.

### Обсуждение проблемы

Предлагаемая статья посвящена запатентованному способу работы 4-тактного ДВС, основное конструктивное отличие которого состоит в том, что в обычном 4-тактном двигателе, кроме выпускного канала с клапаном, имеется дополнительное окно в гильзе цилиндра, прорезанное на уровне НМТ поршня, в связи с чем осуществляется па-

раллельный выпуск как через основной выпускной «канал-клапан», так и дополнительное окно в гильзе цилиндра, поэтому двигатель называется «двигатель с двойным выпуском ОГ» или «двигатель с окном в гильзе ДОГ», а рассматривается в этой статье газообмен в ДОГ [7].

Процесс совершенствования, отработки и доводки газодинамического качества основных элементов газоздушных трактов систем газообмена поршневых ДВС до сих пор производится с помощью метода последовательных переборов или проб, который является пока основным при выполнении такого рода работ.

Как известно, в процессе развития научно-исследовательских работ в области газообмена, в основном используется экспериментальные методы совершенствования и доводки отдельных элементов проточных систем ПДВС, которые и по сей день широко применяются в практике проведения такого рода работ. Однако экспериментальные способы проведения и оценки доводочных работ не может обойтись без какого-то метода, с помощью которого можно будет проводить исследование и определение опытных коэффициентов необходимых при расчете расходных характеристик газоздушных трактов ПДВС. Этот метод должен быть достаточно универсален, прост и информативен, так как с помощью него нужно определять газодинамические характеристики систем газообмена ПДВС и их отдельных элементов, он называется методом статической продувки [2].

Проводя работы по разработке модернизации и отработке проточных каналов ПДВС, приходится постоянно определять и оценивать эффективность мероприятий, про-

водимых для улучшения их расходных характеристик. Оценка и сравнение газодинамической эффективности клапанных и щелевых систем производится обычно с помощью безразмерных коэффициентов расхода  $\mu$  или газодинамического сопротивления  $\xi$ . Кроме того эти коэффициенты используются при проведении расчетов по опорожнению цилиндров в математических моделях [4].

Возникает совершенно справедливый вопрос: в какой степени можно использовать коэффициенты  $\mu$  и  $\xi$  в расчетах течения отработавших газов через органы газообмена, так как они получены методом статической продувки их стационарным потоком? Течение же отработавшего газа в период газообмена явно не стационарно, причем этот процесс сопровождается ещё и внешним теплообменом [1, 3].

Как известно, степень гидродинамической нестационарности процесса течения можно определять рассматривая отношения локальной силы, вызванной неустановившимся характером движения, к силе инерции или рассматривая отношение локального и конвективного ускорений в потоке, а меру этих отношений принято оценивать критерием Струхала.

$$S_h = \frac{l}{W \cdot t}, \quad (1)$$

где  $l$ - характерный линейный размер;  $W$ - скорость потока;  $t$ - время рассматриваемого процесса.

Очевидно, что если число Струхала мало, то нестационарность процесса не накладывает отпечатка на течение, которое можно рассматривать в этом случае как стационарное. Такие процессы принято называть квазистационарными.

Поэтому, в связи с тем, что определение расходных характеристик систем газообмена ПДВС и их основных элементов производится с помощью статической продувки, желательно выяснить в каких случаях течение воздуха и отработавшего газа по каналам газообмена можно считать квазистационарным.

Для этого можно выполнить инспекционный анализ уравнения Навье-Стокса [5, 6].

С этой целью возьмём отношение локального ускорения к конвективному

$$\frac{\partial W_x}{\partial t} / \left( W_x \frac{\partial W_x}{\partial x} \right) \approx \frac{W}{t} \cdot \frac{l}{W^2} = \frac{l}{Wt}, \quad (2)$$

которое, как видно из этой зависимости, соответствует критерию Струхала.

В качестве примера рассмотрим течение воздуха или отработавшего газа в системе

«клапан – седло клапана», расположенного в выпускном тракте ДВС.

За характерный размер  $l$  примем гидравлический диаметр клапана  $D_e$ . Тогда будем иметь

$$D_e = \frac{4 \cdot f_{кл}}{\Gamma} = \frac{4 \cdot \pi \cdot d_{кл} \cdot h_{кл} \cdot \cos \varphi}{\pi \cdot d_{кл}} = \quad (3)$$

$$= 4 \cdot h_{кл} \cdot \cos \varphi$$

где  $\Gamma$ – периметр клапана;  $h_{кл} = 0,1D$ - подъем клапана, в долях от диаметра цилиндра  $D$ ;  $d_{кл}$  - диаметр клапана;  $\varphi$ - угол фаски клапана,  $\varphi = 45^\circ$ . Тогда имеем

$$D_e = 4 \cdot 0,1 \cdot D \cdot \cos 45 = 0,283D. \quad (4)$$

Скорость воздуха или отработавшего газа в системах «клапан – седло клапана» или щели в стенке цилиндра при опорожнении цилиндра, будет

$$W_{кл} = C_m \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4 \cdot f_{кл}} = \quad (5)$$

$$= \frac{S \cdot n}{30} \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4 \cdot \pi \cdot d_{кл} \cdot h_{кл} \cdot \cos \varphi},$$

где  $C_m$  - средняя скорость поршня;  $n$  - частота вращения коленчатого вала двигателя;  $f_{кл}$  - площадь проходного сечения системы «клапан – седло клапана»;  $S$  - ход поршня;  $d_{кл} \cong 0,3D$ - диаметр клапана в долях от диаметра цилиндра  $D$ .

Тогда, подставив в это выражение значение входящих в него величин, получим

$$W_{кл} = \frac{S \cdot n}{30} \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4\pi \cdot 0,3D \cdot 0,1D \cos 45} = \frac{Sn}{2,546}. \quad (6)$$

Время принудительного выпуска будет

$$t = \frac{\Delta \varphi}{6 \cdot n} \cong \frac{180}{6 \cdot n}.$$

Тогда критерий нестационарности процесса, т.е. число Струхала примет вид

$$S_h = \frac{l}{W \cdot t} = \frac{0,283 \cdot D \cdot 2,546 \cdot 6 \cdot n}{S \cdot n \cdot 180} \cong \quad (7)$$

$$\cong 4 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{D}{S},$$

где  $D/S$  - отношение диаметра цилиндра к ходу поршня,  $D/S \approx 1$ .

На основании выражения (7), можно утверждать, что процесс течения воздуха или отработавшего газа в органах газораспределения систем газообмена ПДВС является квазистационарным, т.к. локальное ускорение, в этом случае, существенно меньше (на 2–3 порядка) конвективного.

## О ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ СТАТИЧЕСКОЙ ПРОДУВКИ ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМЫ ГАЗООБМЕНА ВОЗДУХОМ ПРИ МАТЕМАТИЧЕСКОМ МОДЕЛИРОВАНИИ ДВОЙНОГО ВЫПУСКА ОТРАБОТАВШИХ ГАЗОВ ДВИГАТЕЛЯ С ОКНОМ В ГИЛЬЗЕ

Поэтому, опираясь на этот вывод можно сказать, что данные, полученные при определении расходных характеристик элементов систем газообмена ПДВС с помощью статической продувки, могут быть использованы, как для сравнения при проведении доводочных работ по принципу «было – стало», так и для введения в расчеты при математическом моделировании, как в квазистационарные, так и другие модели.

Таким образом, доказав с помощью экспресс анализа [5, 6] правомочность применения метода статической продувки для исследования и доводки проточных систем ПДВС, появляется еще одно направление его применения, в связи с созданием математических моделей – это определение расходных характеристик экспериментальным путем с получением величин и коэффициентов, характеризующих влияние газодинамических потерь и внешнего теплообмена в потоке. Поэтому следует сказать, что, особенно в последнее время, начинает интенсивно развиваться расчетно-теоретические методы определения расходных характеристик, необходимость в которых постоянно возрастает из-за их значительных преимуществ [3, 4].

В связи с этим, вопросом определения расходных характеристик систем газообмена и их основных элементов ПДВС, уделяется, в последнее время еще большее внимание из-за расширяющихся аспектов их применения [3]. Поэтому определение расходных характеристик и оценку газодинамической эффективности впускных и выпускных систем производят обычно с помощью общепринятого метода статической продувки [10], так как с помощью результатов обработки данных статической продувки можно производить определение, исследование, сравнение и оценку проточных систем, а также получать величины  $\mu$ ,  $\xi$ ,  $\mu f$ ,  $\Delta S$  и  $Q$ , необходимые как при сравнении и оценке эффективности мероприятий по их совершенствованию и отработке, так и при использовании их в расчетах по наполнению и опорожнению цилиндров [4], потому что все зависит от того, с какой целью и по какой методике обработки данных статической продувки будут выполняться дальнейшие расчеты.

Если воспользоваться данными, полученными с помощью обычной методики обработки результатов статической продувки воздухом, для сравнения и оценки эффективности мероприятий по доводке любых проточных систем по принципу «было – стало», то можно утверждать следующее.

Для указанной цели можно использовать любую методику обработки, в основу которой положен изоэнтропный процесс расширения рабочего тела в открытой системе, без совершения внешней работы, однако без использования данных статической продувки полученных по этой методике, т.е. величин и коэффициентов  $\mu$ ,  $\xi$ ,  $\mu f$  и  $\Delta S$ , при проведении расчетно-теоретических исследований, по опорожнению цилиндров двигателей.

Однако если будет потребность в проведении работ по совершенствованию и доводке выпускных систем 4-тактных ДОГ, и при этом будет необходимость в проведении расчетных исследований различных конструктивных вариантов с помощью математических моделей, то необходимо проводить обработку данных статической продувки по уточненной методике, в основу которой положен не изоэнтропный, а адиабатный процесс расширения рабочего тела в открытой системе без совершения внешней работы.

Кроме этого, если будет потребность в проведении работ по совершенствованию и доводке выпускных систем 4-тактных ДОГ с учетом внешнего теплообмена, и при этом будет необходимость в проведении расчетных исследований с помощью математических моделей, то обработку данных статической продувки необходимо проводить по методике, в основу которой положен политропный процесс расширения рабочего тела в потоке.

### Выводы

Таким образом, в работе получены следующие результаты:

- во-первых, проведенный инспекционный анализ уравнения Навье-Стокса [5, 6] показал правомочность использования коэффициентов и величин, полученных с помощью статической продувки систем газообмена ДВС и их элементов для проведения теоретических расчетов;

- во-вторых, термогазодинамический анализ изменения параметров рабочего тела в стационарном потоке с газодинамическими потерями и внешним теплообменом показал, что на базе полученных зависимостей для коэффициентов газодинамических потерь  $\xi$ , расхода  $\mu$  и скорости  $\varphi$ , а также для изменения энтропии  $\Delta S$  можно разработать методики обработки данных статической продувки как в адиабатной, так и в политропной постановках, а результаты этих продувок в виде опытных величин и коэффициентов использовать в математических моделях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Балашов А.А. Совершенствование расходных характеристик газоздушных трактов поршневых ДВС: дисс. ... докт. техн. наук / А.А. Балашов.- Алт ГТУ им. И.И. Ползунова, Барнаул, 2008.- 395 с.
2. Винокуров Б.Н. Улучшение экономических показателей дизелей ВТЗ путем совершенствования выпускных каналов / Б.Н. Винокуров и др. // Повышение эксплуатационных показателей двигателей и тракторов.- Пермь, 1987.- С. 19-26.
3. Гришин Ю.А. Аналитический расчет истечения через выпускной клапан / Ю.А. Гришин // Межвузовский сбор. науч. тр.- М.:МГТУ, МАМИ.- Вып. XVII.- 2001.-№ 3.- С. 135-139.
4. Гришин Ю.А. Расчет течения через органы газообмена с использованием продувочных характеристик /Ю.А. Гришин // Международный симпозиум «Образование через науку»: Материалы докладов секции «Двигатели внутреннего сгорания». Отдельный выпуск.- М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2005.- С.110-111.
5. Петриченко Р.М. Рабочие процессы поршневых машин. Двигатели внутреннего сгорания и компрессоры / Р.М. Петриченко, В.В. Оносовский.- Л.: Машиностроение, 1972.- 167 с.
6. Петриченко Р.М. Физические основы внутрицилиндровых процессов в двигателях внутреннего сгорания / Р.М. Петриченко.- Л.: ЛГУ, 1983.- 244 с.
7. Жмудяк Л.М. Способ работы четырёхтактного двигателя внутреннего сгорания / Л.М. Жмудяк.- Патент РФ №2024773. М.кл. F02B 37/00 N4796343, заяв. 28.02.90;; опубл. 15.12.94.- Бюл. № 23, 1994.
8. Седач В.С. Газовая динамика выпускных систем поршневых машин / В.С. Седач.- Харьков:

Высшая школа, 1974.- 171 с.

9. Симсон А.Э. Газотурбинный наддув дизелей / А.Э. Симсон.- М.: Машиностроение, 1964.- 248 с.
10. Соколов С.С. Комплексное совершенствование газораспределительных трактов дизелей, форсированных наддувом / С.С. Соколов, А.А. Лазурко // Экспериментальные и теоретические исследования по созданию новых дизелей и агрегатов: тр. ЦНИДИ / Под ред. В.И. Балакина.- Л., 1980.- С. 62-74.
11. Сонкин В.И. Исследование течения воздуха через клапанные щели / В.И. Сонкин // Испытания автомобилей и двигателей, их агрегатов и деталей.- 1974.- Вып. 149.- С. 21-38.
12. Терский Б.К. Определение массового расхода отработавших газов при течении их из цилиндра двигателя через выпускной клапан / Б.К. Терский // Вестник машиностроения, 2002.- № 11.- С. 77-78.
13. Хачиян А.С. Доводка рабочего процесса автомобильных дизелей / А.С. Хачиян, В.Р. Гальговский, С.Е. Никитин.- М.: Машиностроение, 1976.- 104 с.
14. Шамовский Б.Н. Определение коэффициентов расхода отверстий при истечении газа / Б.Н. Шамовский // Вопросы теории и расчета рабочих процессов тепловых двигателей: межвуз. научн. сборник.- Уфа, 1980.- № 4.- С. 47-54.

**Балашов А.А.**, д.т.н., доц.,  
**Свистула А.Е.**, д.т.н., проф.,  
**Яковлев С.В.**,  
АлтГТУ им. И.И. Ползунова, Барнаул,  
e-mail: [D21200403@mail.ru](mailto:D21200403@mail.ru), тел. (3852)260516.

---

*Работа выполнена в порядке реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы*