

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА РАСХОДА ПРОДУВОЧНЫХ ОКОН ДВУХТАКТНОГО ДВИГАТЕЛЯ С КРИВОШИПНО-КАМЕРНОЙ ПРОДУВКОЙ

Е.А. Герман, А.А. Балашов, А.Г. Кузьмин

Мощностные и экономические показатели двухтактных двигателей с кривошипно-камерной продувкой ДК ДВС в значительной степени зависят от качества протекания рабочего процесса и процесса газообмена в частности. Совершенствование процесса газообмена является одним из перспективных направлений и позволяет значительно повысить технический уровень двухтактных двигателей.

Совершенствование рабочего процесса двигателя, как правило, требует комплексного решения различных задач. Высокая частота вращения коленчатого вала и особенность организации рабочего процесса ДК ДВС значительно сокращают время газообмена. Поэтому аэродинамическое совершенство газозвдушного тракта в полной мере определяет качество рабочего процесса и технические характеристики двигателя в целом.

Теоретически определить влияние конструктивных факторов на расходную характеристику газозвдушного тракта зачастую невозможно. Использование численных методов расчета движения газа в каналах двигателя требует введения экспериментальных коэффициентов. Выполнение экспериментов непосредственно на двигателе приводит к существенному увеличению трудоемкости и времени исследований. Предварительно оценить совершенство газозвдушного тракта и его отдельных элементов стремятся на простых (по конструкции и методам измерения) установках.

В инженерной практике конструктивной отработки газозвдушного тракта двигателя и его отдельных элементов широко применяется статическая продувка. Сущность метода заключается в следующем: входное сечение исследуемого канала соединяют с ресивером большого объема, в котором определяют температуру T_1^* и давление P_1^* заторможенного потока. Используя счетчик газа или специальную расходомерную шайбу, определяют объемный расход воздуха Q . Выходное сечение канала соединяют со спрямляющим патрубком для выравнивания потока, в котором с помощью дренажных отверстий в стен-

ке определяют среднее по периметру сечения статическое давление P_2 . По результатам продувки рассчитывают статическую температуру T_2 , критерий (число) Маха M и давление заторможенного потока P_2^* в этом же сечении, а также параметры характеризующие аэродинамическое совершенство канала. К таким параметрам относятся: коэффициент расхода μ , коэффициент газодинамического сопротивления ξ , коэффициент восстановления полного давления σ и др. Эти параметры позволяют провести сравнительную оценку аэродинамической эффективности элементов газозвдушного тракта и влияния вносимых конструктивных изменений в процессе их доводки. Коэффициент расхода, среди прочих, наиболее часто используемый параметр при математическом моделировании процессов впуска, продувки, выпуска.

В процессе доводки газозвдушного тракта двигателя необходимо оценить влияние отдельных элементов на общее аэродинамическое сопротивление, а также знать численное значение коэффициента расхода μ этих элементов для математического моделирования процесса газообмена. Проведение статической продувки отдельных элементов газозвдушного такта в некоторых случаях технологически сложно (например, продувочные окна двухтактного двигателя). Проблема заключается в определении статического давления в выходном сечении продувочных окон при различной площади их открытия. В таких случаях измеряют давление в цилиндре, считая его заторможенным, и далее определяют коэффициент восстановления полного давления σ . Продувочные окна имеют углы наклона в плане и к оси цилиндра, обеспечивая движение воздуха во время продувки по траектории в форме «петли» для очистки полости цилиндра от продуктов сгорания. По этой причине считать давление в цилиндре в процессе продувки заторможенным не обосновано.

Для решения этой и подобных задач предлагается расчетно-экспериментальный метод определения коэффициента расхода отдельных элементов газозвдушного тракта

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА РАСХОДА ПРОДУВОЧНЫХ ОКОН ДВУХТАКТНОГО ДВИГАТЕЛЯ С КРИВОШИПНО-КАМЕРНОЙ ПРОДУВКОЙ

двигателя. Необходимо в изложенную выше методику обработки результатов статической продувки ввести дополнительный параметр ΔS (изменение энтропии), который определяет величину необратимых потерь кинетической энергии в адиабатном потоке. В отличие от безразмерных коэффициентов ξ и μ величина ΔS обладает свойством аддитивности (характеристика всего потока получается суммированием тех же характеристик элементов потока). Подробно данная методика изложена в работе [1].

Практическая реализация метода

В качестве объекта исследования был использован двухтактный карбюраторный двигатель «Бийск-45» (АНПМК «Конвейер», г. Бийск).

Для определения коэффициентов расхода продувочных и выпускных окон продувка цилиндра двигателя проводилась в два этапа.

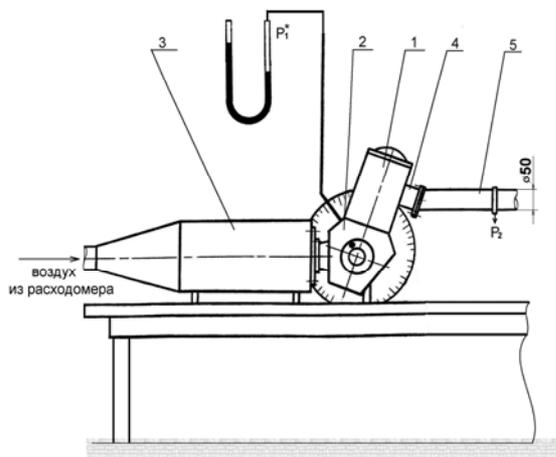


Рис. 1. Схема продувки цилиндра двигателя на первом этапе: 1 – блок цилиндров; 2 – картер; 3 – ресивер; 4 – выпускной коллектор; 5 – спрямляющий патрубок

Схема продувки продувочных и выпускных окон на первом этапе представлена на рис.1. Воздух нагнетателем объемного типа «Рутс» подается в ротационный газовый счетчик РГ-100(РГ-400). Из расходомера воздух поступает в ресивер 3, который с помощью переходного фланца соединен с картером двигателя 2. На выходе выпускного коллектора 4 установлен спрямляющий патрубок 5 $\varnothing 50$ мм. Избыточное давление и температура заторможенного потока на входе измеряется непосредственно в кривошипной камере. Угол поворота коленчатого вала двигателя во

время проведения испытаний определяется по градуированному диску.

Продувка цилиндра проводилась при различных углах поворота коленчатого вала (различной площади проходного сечения продувочных и выпускных окон) от $\varphi=180^\circ$ (НМТ) до момента закрытия продувочных окон. При каждом фиксированном положении поршня в цилиндре двигателя изменялось избыточное давление в кривошипной камере от 50 до 500 мм.вд.ст. с шагом 50 мм.вд.ст.

Основные измеряемые параметры:

Q^* - объемный расход воздуха, м³/ч;

p_1^* - избыточное давление заторможенного потока в кривошипной камере, мм.вд.ст.;

t^* - температура заторможенного потока в кривошипной камере, °С;

p_2^* - избыточное статическое давление в спрямляющем патрубке, мм.вд.ст.

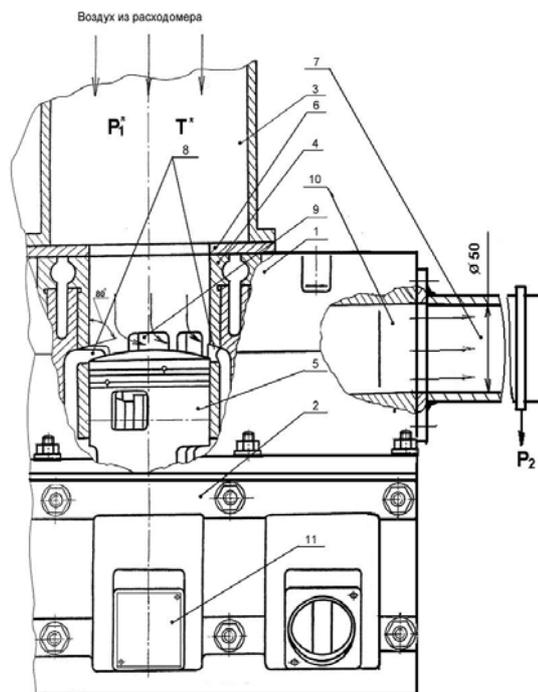


Рис. 2. Схема продувки выпускных окон двигателя на втором этапе: 1 – блок цилиндров; 2 – картер; 3 – ресивер; 4 – гильза цилиндра; 5 – поршень; 6 – фланец; 7 – спрямляющий патрубок; 8 – продувочные окна; 9 – выпускные окна; 10 – выпускной коллектор; 11 – заглушка

На втором этапе была проведена продувка только выпускных окон 9 рис. 2. Для этого ресивер 3 был закреплен через фланец 6 непосредственно к блоку цилиндров 1. Чтобы исключить утечку воздуха через продувочные окна 8, входное отверстие в картере 2 было закрыто заглушкой 11. Продувка осуще-

ствлялась со спрямляющим патрубком $\varnothing 50\text{мм}$, который крепился к выпускному коллектору 10. Испытания проводились при различных углах поворота коленчатого вала от $\varphi=180^\circ$ (НМТ) до момента закрытия выпускных окон. При каждом фиксированном положении поршня 5 избыточное давление в ресивере изменялось от 100 до 2000 мм.вд.ст. с шагом 100мм.вд.ст.

Основные измеряемые параметры:

Q - объемный расход воздуха, $\text{м}^3/\text{ч}$;

p_1 - избыточное давление заторможенного потока в ресивере, мм.вд.ст.;

t^* - температура заторможенного потока в ресивере, $^\circ\text{C}$;

p_2 - избыточное статическое давление в спрямляющем патрубке, мм.вд.ст.

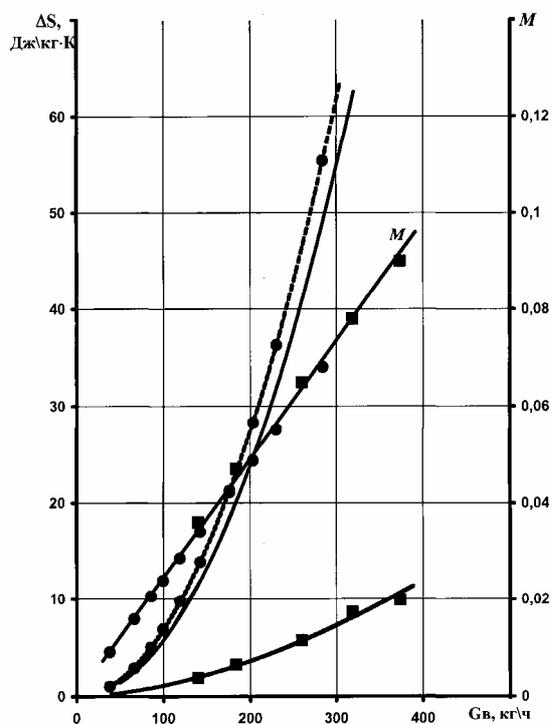


Рис. 3. Зависимость ΔS и числа M (критерий Маха) выпускных и продувочных окон от расхода воздуха при положении поршня в НМТ ($\varphi=180^\circ$ п.к.в.): — продувочные окна; ●(продувочные+выпускные окна); ■ выпускные окна

Средний расход воздуха через один цилиндр по данным стендовых испытаний двигателя «Бийск-45» в диапазоне частот вращения коленчатого вала $n=4900\div 5600\text{мин}^{-1}$ изменяется от 50кг/ч до 70кг/ч .

На рисунке 3 представлены зависимости величин ΔS от массового расхода воздуха G_v при положении поршня в НМТ продувочных и

выпускных окон совместно и выпускных окон отдельно, а также критерия Маха в спрямляющем патрубке 5 (рис. 1). График ΔS продувочных окон получен расчетным путем, используя свойство аддитивности энтропии. Как видно из рисунка, зависимость числа M в спрямляющем патрубке от расхода воздуха остается неизменной как при продувке выпускных и продувочных окон вместе, так и при продувке только выпускных окон. Это позволяет определить коэффициент расхода продувочных окон, не прибегая к непосредственному измерению статического давления в выходном сечении продувочных окон.

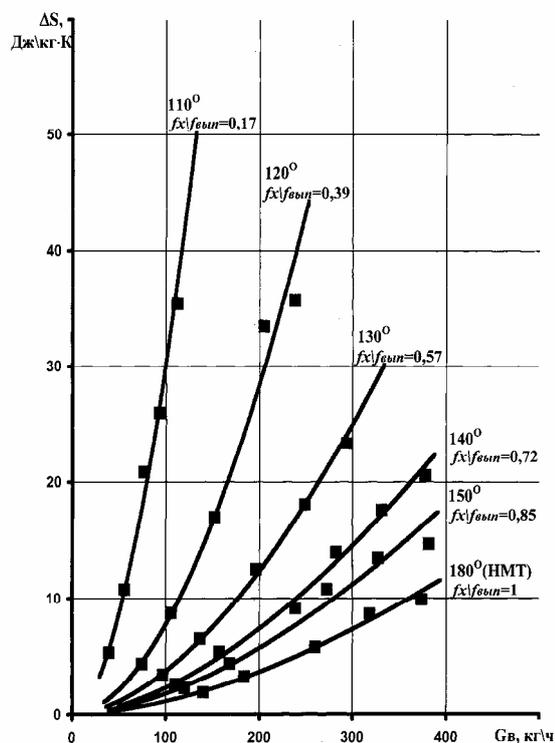


Рис. 4. Зависимость ΔS выпускных окон от расхода воздуха при различных углах поворота коленчатого вала (различном положении поршня): $f_x/f_{\text{вып}}$ – относительная площадь выпускных окон

Аэродинамическое сопротивление продувочных окон при положении поршня в НМТ в диапазоне изменения расхода воздуха от 50кг/ч до 100кг/ч в среднем в 4 раза выше, чем у выпускных окон. Столь значительная разница в аэродинамическом сопротивлении обусловлена следующими причинами:

- величина необратимых потерь энергии потока в продувочных окнах включает потери в продувочных каналах, окнах, а также в цилиндре при движении воздуха вплоть до выпускных окон;

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА РАСХОДА ПРОДУВОЧНЫХ ОКОН ДВУХТАКТНОГО ДВИГАТЕЛЯ С КРИВОШИПНО-КАМЕРНОЙ ПРОДУВКОЙ

- продувочные каналы, в особенности центральный, имеют сложную конфигурацию с поворотом оси канала вблизи боковых продувочных окон на угол 80° (рис. 2).

Зависимость ΔS выпускных окон от расхода воздуха при различных положениях поршня (относительной площади сечения) представлена на рисунке 4. С уменьшением относительной площади сечения выпускных окон возрастает аэродинамическое сопротивление в соответствии с кинематикой перемещения поршня, причем, величина ΔS зависит как от геометрии канала (площади проходного сечения окон), так и от режима течения воздуха.

На рис. 5 представлены расчетные кривые ΔS продувочных окон в зависимости от расхода воздуха при различном положении поршня (относительной площади проходного сечения). Они построены таким же образом, как и кривая ΔS продувочных окон на рисунке 3. По мере закрытия окна до относительной площади $f_x \cdot f_{прод} = 0,51$ происходит плавный рост аэродинамического сопротивления. При изменении относительной площади сечения с $0,51$ ($\varphi = 140^\circ$) до $0,24$ ($\varphi = 130^\circ$) аэродинамическое сопротивление возрастает приблизительно в 10 раз. Полное закрытие окна происходит при $\varphi = 122,5^\circ$. Значительный рост сопротивления продувочных окон в этот период связан в основном с двумя причинами. Во-первых, площадь проходного сечения продувочных окон при повороте коленчатого вала на 10° уменьшается в 2 раза. Во-вторых, угол наклона верхней кромки центрального продувочного окна к оси цилиндра составляет 30° , поэтому по мере закрытия окна угол наклона струи воздуха к оси цилиндра уменьшается, что приводит к уменьшению ее поперечного сечения.

Для определения действительного расхода воздуха через продувочные и выпускные окна при математическом моделировании процесса газообмена необходимо знать значения коэффициентов расхода окон.

С увеличением расхода воздуха в диапазоне $G_v = 50 \div 350 \text{ кг/ч}$ растет значение коэффициента расхода воздуха выпускных окон в среднем от $0,65$ до $0,77$ в интервале изменения относительной площади окон $f_x \cdot f_{вып} = 1,0 \div 0,39$ (рис. 6). Подобным образом происходит изменение коэффициента расхода продувочных окон (рис. 7). В диапазоне $G_v = 50 \div 300 \text{ кг/ч}$ при изменении относительной площади окон $f_x \cdot f_{прод} = 1,0 \div 0,24$ среднее значение коэффициента расхода продувочных окон изменяется от $0,37$ до $0,52$.

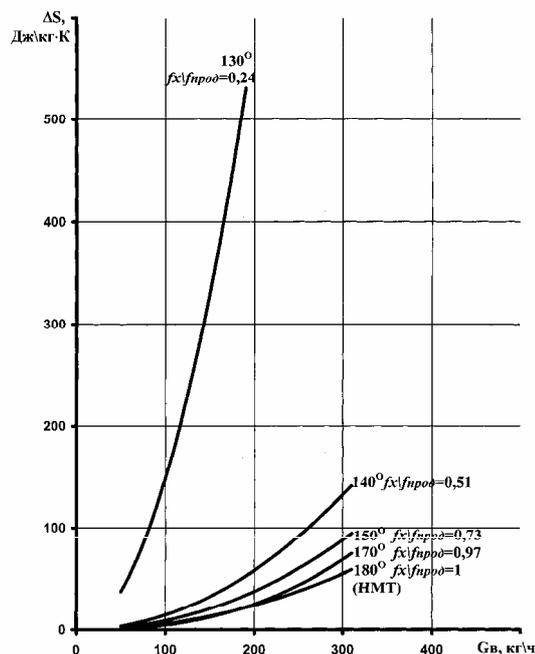


Рис. 5. Зависимость ΔS продувочных окон от расхода воздуха при различных углах поворота коленчатого вала (различном положении поршня): $f_x \cdot f_{прод}$ – относительная площадь продувочных окон

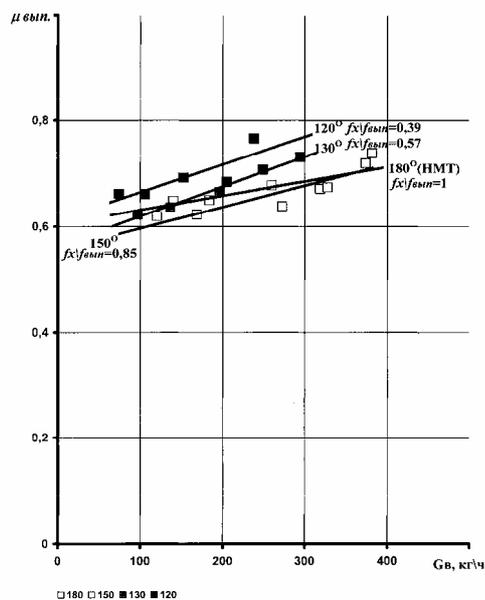


Рис. 6. Зависимость коэффициента расхода выпускных окон от расхода воздуха при различных положениях поршня: $f_x \cdot f_{вып}$ – относительная площадь выпускных окон

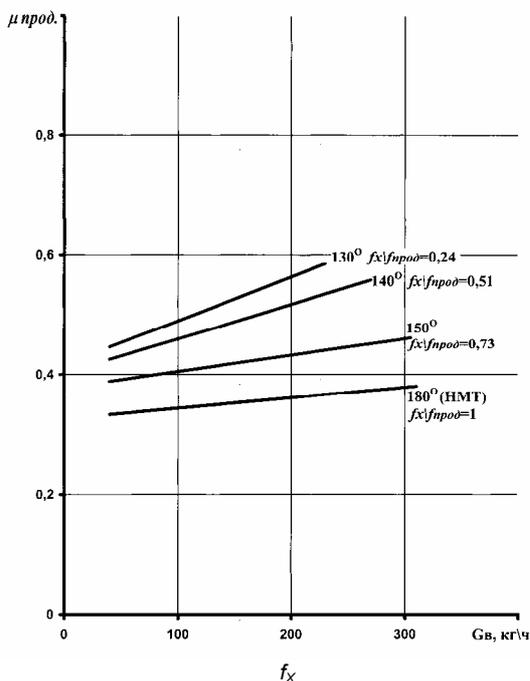


Рис. 7. Зависимость коэффициента расхода продувочных окон от расхода воздуха при различных положениях поршня: $f_{прод}$ – относительная площадь продувочных окон

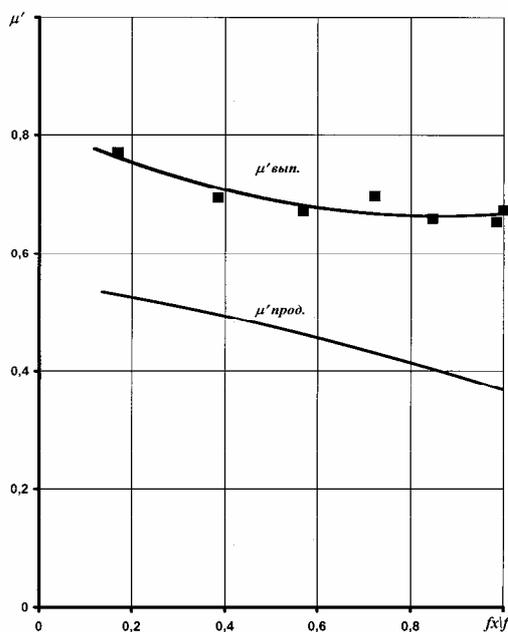


Рис. 8. Зависимость коэффициентов расхода $\mu'_{вып.}$ и $\mu'_{прод.}$ (осредненных по расходу воздуха) от относительной площади выпускных и продувочных окон

На рис. 8 представлены графики изменения коэффициентов расхода продувочных

и выпускных окон, осредненных по расходу воздуха, в зависимости от относительной площади сечения окон. Для удобства использования данных статической продувки при математическом моделировании полученные значения коэффициентов расхода были аппроксимированы полиномом второй степени:
 $\mu'_{вып.} = 0,2082(f_x/f_{вып.})^2 - 0,3582(f_x/f_{вып.}) + 0,8174$, достоверность аппроксимации 0,89;
 $\mu'_{прод.} = -0,0561(f_x/f_{прод.})^2 - 0,1289(f_x/f_{прод.}) + 0,5527$, достоверность аппроксимации 0,92.

Начало открытия выпускных окон соответствует $102,7^\circ$ поворота коленчатого вала после ВМТ. Продолжительность открытия окон – $154,6^\circ$. Площадь выпускных окон при положении поршня в НМТ (максимальная площадь) составляет $10,53\text{см}^2$ (рис. 9). Полное эффективное проходное сечение выпускных окон – $7,09\text{см}^2$, что на 32,6% меньше теоретического.

Площадь продувочных окон при полном их открытии на 8 % больше чем выпускных $f_{вып.}$, что составляет $f_{прод.} = 11,44\text{см}^2$. Однако максимальное эффективное проходное сечение продувочных окон практически на 40 % меньше выпускных – $\mu'f_{прод.} = 4,28\text{см}^2$.

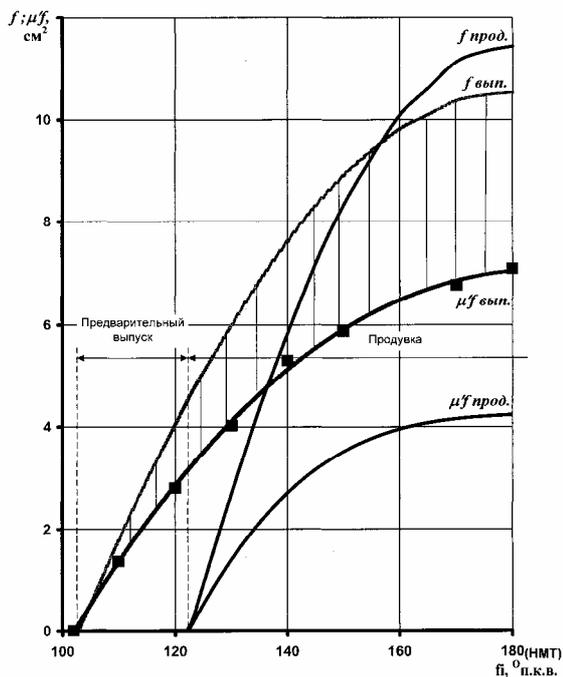


Рис. 9. Изменение теоретического f и эффективного $\mu'f$ проходных сечений выпускных и продувочных окон по углу поворота коленчатого вала (различном положении поршня)

Продувочные окна открываются при $\phi=122,5^\circ$ п.к.в. после ВМТ. Теоретическая продолжительность предварительного выпуска составляет $19,8^\circ$ п.к.в. Продолжительность

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА РАСХОДА ПРОДУВОЧНЫХ ОКОН ДВУХТАКТНОГО ДВИГАТЕЛЯ С КРИВОШИПНО-КАМЕРНОЙ ПРОДУВКОЙ

открытия продувочных окон - 115° поворота коленчатого вала (рис. 9).

Основные выводы по результатам статической продувки цилиндра двигателя «Бийск-45»:

- использование свойства аддитивности изменения энтропии позволяет определить расчетным способом величину аэродинамического сопротивления и коэффициента расхода продувочных окон, не прибегая к непосредственному измерению статического давления в выходном сечении;

- максимальные эффективные проходные сечения выпускных окон на 32,6%, а продувочных на 62,6% меньше их полных теоретических сечений, разница значений которых составляет 8% в пользу продувочных окон;

- коэффициент расхода продувочных окон в среднем в 1,6 раза меньше, чем выпускных, в основном по причине резкого изменения направления движения потока воздуха

в продувочных каналах, особенно в центральном;

- полученные значения коэффициентов расхода продувочных и выпускных окон позволяют при математическом моделировании процесса газообмена определить действительный расход воздуха через окна.

ЛИТЕРАТУРА

1. Балашов А.А., Герман Е.А. Методика обработки результатов статической продувки каналов двигателя // Повышение экологической безопасности автотракторной техники: Сборник научных статей. – Барнаул, 2004. – С. 143-150.

2. Балашов А.А., Кузьмин А.Г., Савельев Г.М. Уточненная методика статической продувки воздухом выпускных каналов дизелей // Актуальные проблемы двигателестроения: Тезисы докладов всесоюзной научно-технической конференции. – Владимир, 1987. – С. 185-188.

3. Седов Л.И. Методы подобия и размерности в механике. – Л.: Наука, 1967.-428 с.