

обеднение газовоздушной смеси должно сопровождаться постепенным увеличением угла до 40 °кв.

Коэффициент избытка воздуха для устойчивой работы двигателя на природном газе должен изменяться от 0,8 до 1,45. Концентрационные пределы по коэффициенту избытка воздуха для сгорания природного газа несколько шире, но за пределами указанного диапазона начинают действовать факторы, ухудшающие условия сгорания и приводящие к снижению показателей работы двигателя. Соответственно, отключение цилиндров происходит в границах указанного диапазона.

#### **Заключение**

Для обеспечения максимальной энергоэффективности газопоршневой мини-ТЭЦ необходимо обеспечить комбинированное управление мощностью: в диапазоне от 50 до 100% мощности осуществлять качественное управление мощностью за счет изменения цикловой порции при полностью открытой дроссельной заслонке, в диапазоне до 50% мощности необходим переход на количественное регулирование мощности за счет изменения положения дроссельной заслонки.

При снижении мощности отключение нескольких цилиндров обеспечивает работу на более экономичных режимах на частичных нагрузках, по сравнению с работой всех цилиндров на тех же нагрузках, при этом наблюдается одинаковый уровень электрической и тепловой мощности. Отключение более четырех цилиндров приводит к значительному обогащению топливовоздушной смеси (при качественном регулировании) и, соответственно, ухудшению экономических показателей установки.

Внедрение отключения части работающих цилиндров позволяет обеспечить повышение эко-

номичности миниТЭЦ от 1 до 7 % (по эффективному КПД) в зависимости от режима работы.

За счет внедрения комбинированного регулирования мощности и отключения части работающих цилиндров на частичных режимах возможно обеспечить следующие показатели в диапазоне от 40 до 110% электрической мощности:

- электрический КПД - 31 - 33 %;
- тепловой КПД - 52 - 55 %;
- общий КПД миниТЭЦ - 80 - 85 %

#### **Список литературы:**

1. *Тепловые двигатели: Учеб. Пособие для вузов / Под ред. И.Н. Нигматулина. М. «Высшая школа», 1974. – 375 с.*
2. *Гольдинер, А.Я. Газопоршневые электроагрегаты / А.Я.Гольдинер, М.И. Цыркин, В.В. Бондаренко. – СПб.: Галлея Принт, 2006. – 240 с.*
3. *Лушпа, А.И. Основы химической термодинамики и кинетики химических реакций / А.И. Лушпа. – М.: Машиностроение, 1981. – 240 с.*
4. *Кулманакон, С.П.Повышение энергоэффективности газопоршневого двигателя при работе на частичных режимах / С.П.Кулманакон, С.С.Кулманакон // Вестник Сибирского отделения Академии военных наук. - 2011.- № 10 - С. 215-220.*

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

1. *Teplovyje dvigateli: Ucheb. Posobie dlja vuzov / Pod red. I.N. Nigmatulina. M. «Vysshaja shkola», 1974. – 375 s.*
2. *Gol'diner, A.Ja. Gazoporshnevye jelektroagregaty / A.Ja.Gol'diner, M.I. Cyrkin, V.V. Bondarenko. – SPb.: Galleja Print, 2006. – 240 s.*
3. *Lushpa, A.I. Osnovy hi-micheskoj termodinamiki i kinetiki himicheskij reakcij / A.I. Lushpa. – M.: Mashinostroenie, 1981. – 240 s.*
4. *Kulmanakov, S.P.Povyshenie jenergojeffektivnosti gazoporshnevogo dvigatelja pri rabote na chastichnyh rezhimah / S.P.Kulmanakov, S.S.Kulmanakov // Vestnik Sibirsogo otdelenija Akademii voennyh nauk. - 2011.- № 10 - S. 215-220.*

Работа выполнена при поддержке федеральной целевой программы (ФЦП) «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы

УДК 621.436

*С. И. Тырловой, канд. техн. наук*

## **УЧЕТ ВОЛНОВЫХ ЯВЛЕНИЙ В КАНАЛЕ ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКОЙ ФОРСУНКИ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ПРОЦЕССА ВПРЫСКА В АККУМУЛЯТОРНОЙ СИСТЕМЕ ПИТАНИЯ**

**Постановка проблемы.** В связи с возрастающим использованием аккумуляторных систем питания (АСП) возникают вопросы по определению и прогнозированию эксплуатационных расхо-

дов топлива транспортных установок с АСП при различных условиях эксплуатации, включающие в себя физические свойства топлива, износ элементов топливной аппаратуры, режимы работы. При

этом следует учитывать, что переходные процессы автомобильных силовых установок составляют значительную долю общего времени их работы. Данных, содержащихся в технических характеристиках установок с ДВС, совершенно недостаточно для решения поставленной задачи определения путевого расхода топлива в различных условиях эксплуатации названных транспортных средств, такие данные отсутствуют и в имеющейся литературе.

Для расчетного определения эксплуатационного расхода топлива установок с дизелями, оснащенными АСП, на первом этапе исследования необходимо иметь несложную расчетную модель АСП, позволяющую, в то же время, достаточно достоверно оценить подачу топлива за рабочий цикл с учетом износов ТА и физических свойств топлива. Это связано с необходимостью выполнять счет большого числа переходных процессов, включающих в себя множество рабочих циклов. Для решения проблемы, прежде всего, необходимо иметь модель АСП, пригодную для определения цикловых подач топлива в зависимости от режима работы ДВС. В этой связи представляет интерес, как влияет метод расчета впрыскивания топлива на величину цикловой подачи.

В настоящей работе выполнено моделирование гидродинамических процессов в канале ЭГФ двумя методами: как на основе одномерного представления неустановившегося движения жидкости, так и статическим методом. Это позволяет количественно оценить влияние волновых процессов в канале электрогидравлической форсунки на цикловую подачу топлива при различных режимах работы двигателя.

**Анализ последних исследований и публикаций.** Устройство аккумуляторных систем впрыска и их функционирование достаточно хорошо описано во многих работах, например [1-4]. Математическое описание этих систем и их элементов приведено в [4-7] и других. Известно, что для моделирования процесса впрыскивания применяются как статические (система с сосредоточенными параметрами), так и динамические (система с рассредоточенными параметрами) методы расчета. Различия в результатах расчета этими методами могут быть весьма существенными и пренебрежительно малыми. В отношении АСВ таких специальных исследований не проводилось. В результате анализа расчетных и экспериментальных исследований

отечественных и зарубежных авторов [2-4,7] можно заключить, что волновые явления в нагнетательных трубопроводах и каналах форсунки имеют место, но не оказывают существенного влияния на процессы впрыскивания по причине малой длины трубопроводов (<150 мм). В то же время никаких числовых данных в доступных литературных источниках не приводится. Настоящая статья в известной степени может устранить названный пробел.

**Цель исследования** – оценить необходимость учета волновых процессов в канале электрогидравлической форсунки на цикловую подачу топлива в аккумуляторной системе впрыска.

**Материалы и результаты исследований.** Известные методы расчета гидродинамических процессов условно можно разделить на две группы: так называемые статические (квазистационарные) и динамические [8]. Используемый в данной работе алгоритм динамического метода расчета базируется на одномерном представлении неустановившегося движения слабо газированной жидкости в нагнетательном трубопроводе. Также как и в случае упрощенного расчета, жидкость полагается баротропной, а явлениями теплообмена пренебрегается.

В расчетную схему (рис. 1) включен топливный насос высокого давления 4-го поколения СР 4.1, который оснащен одним поршнем, приводимым в движение 2-х кулачковым валом с передаточным числом 1:1 от коленчатого вала. Подкачка топлива осуществляется посредством дополнительного электрического топливного насоса, создающего постоянное давление на выходе 0,47МПа.

Система уравнений имеет известное решение [8] в форме Д'Аламбера. Диссипативные явления учитываются путем эвристического включения в решение уравнения коэффициента в виде декремента затухания волн. Модель уточнена понятием «следа прошедших волн», введенном проф. Крайнюком А.И. [9]. Названный учет следа ( $P_{st}$ ) прошедших волн позволяет повысить точность расчета. След прошедших волн – это изменение статического давления в процессе затухания волн.

Система этих уравнений в этом случае имеет вид:

$$\begin{cases} P = P_0 + F \left( t - \frac{x}{a} \right) \cdot e^{-k \cdot x} + W \left( t + \frac{x}{a} \right) \cdot e^{-k(L-x)} + P_C^F + P_C^W \\ U = \frac{1}{a \cdot \rho} \cdot \left[ F \left( t - \frac{x}{a} \right) \cdot e^{-k \cdot x} - W \left( t + \frac{x}{a} \right) \cdot e^{-k(L-x)} \right] \end{cases}$$

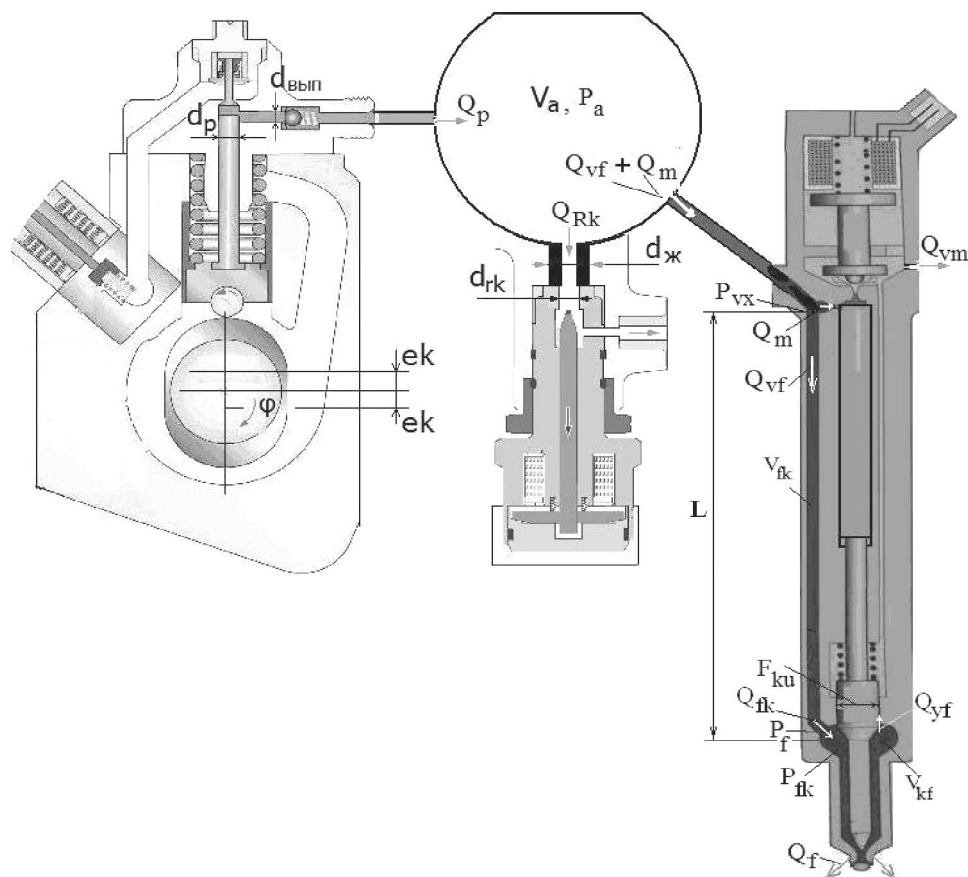


Рис. 1. Расчетная схема аккумуляторной системы питания

Это основные расчетные формулы для реализации на ЭВМ динамического и статического методов. Обозначения объемов, давлений и сечений показано на рис.1:  $Q$ –секундный расход,  $\beta$ –коэффициент сжимаемости,  $\rho$  – плотность дизельного топлива,  $dt$ –шаг интегрирования,  $W, F$ –прямая и обратная волны. Давление в аккумуляторе вычисляется одинаково для статической и динамической моделей:

$$P_{a(j+1)} = P_a + \frac{1}{\beta V_a} (Q_p - Q_{Rk} - Q_{vf} - Q_m) dt$$

То же касается давлений в полостях насоса и мультипликатора. Для динамической модели - давление на входе в канал форсунки [9]:

$$P_{vx(j+1)} = P_{vx} + \frac{1}{\beta V_f} (Q_{vf} - \frac{F_l}{Z} (P_{vx} + (2e^{-kl})W(1) - P_{st}) dt$$

и давление на выходе из канала форсунки:

$$P_{f(j+1)} = P_f + \frac{1}{\beta V_{fk}} (\frac{F_l}{Z} (2e^{-kl})F(1) - P_f + P_{st} - Q_f - F_{ku} C_u - Q_{yf}) dt .$$

Отличия в реализации статического метода в отсутствии выражений для прямой и обратной волн на входе и выходе из канала форсунки: для статической модели - давление в канале форсунки:

$$P_{f(j+1)} = P_f + \frac{1}{\beta V_{fk}} (f_{fk} \sqrt{\frac{2}{\rho} |P_a - P_f|} - f_{fk} \sqrt{\frac{2}{\rho} |P_f - P_{fk}|}) dt$$

и давление в кармане форсунки:

$$P_{fk(j+1)} = P_{fk} + \frac{1}{\beta V_{kf}} (Q_{vf} - Q_f - Q_{yf} - F_{ku} C_u) dt .$$

Далее моделировались процессы впрыскивания по динамической и статической моделям при частотах вращения 800, 1000, 2000 и 3800 мин<sup>-1</sup>. На рис. 2, 3 показаны результаты расчета процесса впрыскивания в один цилиндр при  $n=3800$  мин<sup>-1</sup>, (здесь  $P$  – давление в надплунжерной полости насоса,  $H_{КВ}$  – открытие его впускного клапана).

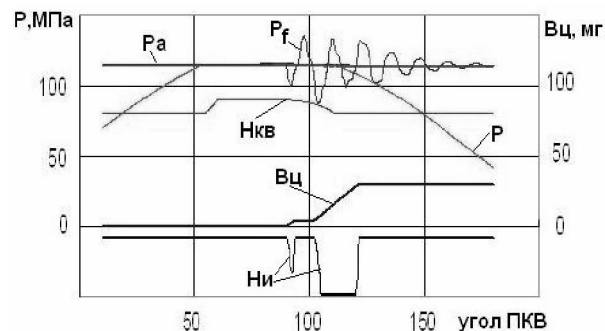


Рис. 2. Показатели процесса впрыскивания по динамической модели при  $n=3800$  мин<sup>-1</sup>

Отличия ( $\Delta$ ) в величинах цикловых подач ( $V_{ц}$ ) при использовании динамического и статического методов изменяются от 0,7% при  $n=800 \text{ мин}^{-1}$  до 4% при  $n=3800 \text{ мин}^{-1}$ . Меньшие значения  $V_{ц}$  получаются при динамическом моделировании.

При использовании статической модели оказалось, что минимальный шаг интегрирования должен быть уменьшен, по сравнению с динамической моделью, в 5...10 раз (в случае применения наипростейшего метода - Эйлера) для получения идентичных результатов, не зависящих от дальнейшего дробления шага.

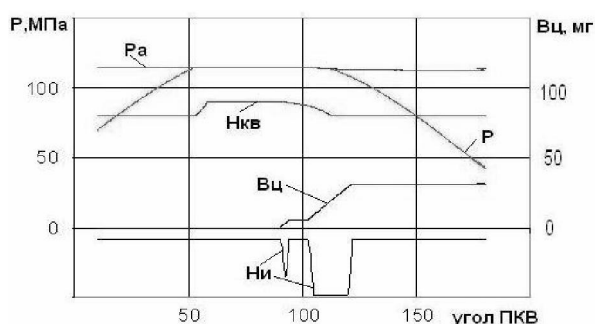


Рис. 3. Показатели процесса впрыскивания по статической модели при  $n=3800 \text{ мин}^{-1}$

В результате время счета процесса впрыскивания по статической модели оказалось выше в 2-2,5 раза. Очевидно, это обусловлено малым объемом кармана форсунки ( $100 \text{ мм}^3$ ).

#### Выводы.

1. Амплитуды колебаний давлений в кармане форсунки изменяются, главным образом, в зависимости от частоты вращения ДВС и достигают 36% от давления в аккумуляторе при частоте вращения  $3800 \text{ мин}^{-1}$ .

2. Меньшие значения расчетных цикловых подач дизельного топлива получаются при учете волновых явлений в канале электрогидравлической форсунки.

3. Серия расчетов, выполненных по приведенным методикам, показали, что отличия в цикловых подачах и амплитудах колебаний давлений в канале форсунки при использовании статического и динамического методов расчета возрастают с увеличением частоты вращения.

Отличия в цикловых подачах для минимальной и максимальной частот вращения ДВС при использовании статического и динамического методов расчета составляют, соответственно, 0,7 и 4%

при одинаковых периодах пилотного и основного впрыскиваний топлива.

4. При реализации на ЭВМ метода Эйлера для расчета процесса впрыскивания в аккумуляторной системе статическая модель требует в 10 раз более мелкого шага интегрирования, чем динамическая модель из-за малости объема кармана форсунки.

5. Приведенные в литературе экспериментальные данные, показывают, что в кармане форсунки имеют место колебания давления. Сопоставление этого с полученными расчетными результатами, позволяет заключить, что более точное моделирование обеспечивается при учете волновых явлений в канале электрогидравлической форсунки аккумуляторной системы впрыска.

6. Время счета процесса впрыскивания с использованием динамической модели заметно меньше чем статической из-за большей допустимой величины шага интегрирования в случае применения наиболее простого метода Эйлера, что позволяет рекомендовать динамическую модель для расчета переходных процессов дизеля с АКВ.

#### Список литературы:

1. Марченко, А.П. Двигуни внутрішнього згорання: Серія підручників у 6 томах. Т.3. Комп'ютерні системи керування ДВЗ / А.П. Марченко, М.К. Рязанцев, А.Ф. Шеховцов; Мін-во освіти і науки України; за ред. А.П. Марченка та А.Ф. Шеховцова.— Х.: Прапор, 2004 - 344 с.
2. Riesenber, K.-O. Dieselmotor-Management /Bosch. Hrsg.: Robert Bosch GmbH, Unternehmensbereich Kraftfahrzeug-Ausrüstung, Abteilung Technische Information (KH/VDT). Die Deutsche Bibliothek-CIP-Einheitsaufnahme. / K.-O. Riesenber und andere; Chef-Red. Horst Bauer; aktualisierte und erw. Aufl.-Braunschweig; Wiesbaden: Vieweg, 1998. - 304s.
3. Грехов, Л.В. Топливная аппаратура и системы управления дизелей: Учебник для вузов /Л.В. Грехов, Н.А. Иващенко, В.А. Марков. - М.: Легион Автодата, 2005. - 344 с.
4. Зенин С.Ю. Розробка методу прискореного діагностування автомобільних дизелів з акумуляторними системами паливоподачі: автореф. дисс. ... канд. техн. наук: 05.22.20 / С.Ю. Зенин. - Х.: ХНАДУ, 2009. - 20 с.
5. Врублевський, О.М. Наукові основи вибору параметрів акумуляторної паливної апаратури з електронним керуванням для високообертового дизеля: автореф. дисс. ... докт. техн. наук: 05.05.03 / О.М. Врублевський. - Х.: ХНАДУ, 2010. - 36 с.
6. Емельянов, И.А. Развитие комплекса математических моделей дизеля, оснащенного аккумуляторной топливной системой с электронным управлением: автореф. дисс. ... канд. техн. наук.: 05.02.08./ И.А. Емельянов - М.: МАДИ (ГТУ), 2007. - 18 с.
7. Пойда, А.Н. Анализ технического состояния топливной аппаратуры на основе колебаний давления топлива в гидроаккумуляторе / А.Н. Пойда, Е.Ю. Зенин. Двигатели внутреннего сгорания: 2009. - Вып. 1. -С. 114-118.
8. Двигатели внутреннего сгорания: Теория поршневых и комбинированных двигателей. Учебник для студентов вузов, обучающихся по специальности «Двигатели внутреннего сгорания»/ Д. Н Вырубов,

Н.А. Иващенко, В.И. Ивин и др.; под ред. А.С. Орлина, М.Г. Круглова. - [4-е изд., перераб. и доп.]. - М.: Машиностроение, 1983. - 372с. 9. Крайнюк, А.И. Моделирование движения жидкости в топливных трубопроводах высокого давления дизелей с учетом следа прошедших волн/ А.И. Крайнюк, С.И. Тырловой, В.В. Гладков. Вестник СУДУ.-2000. - №5(27). - С. 133-136.

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

1. Marchenko, A.P. Dviguni vnutrishn'ogo zgorjannja: Serija pidruchnikov u 6 tomah. T.3. Komp'juterni sistemi keruvannja DVZ / A.P. Marchenko, M.K. Rjazancev, A.F. Shehovcov; Min-vo osviti i nauki Ukraïni; za red. A.P. Marchenka ta A.F. Shehovcova.— H.: Prapor, 2004 - 344 s. 2. Riesenberг, K.-O. Dieselmotor-Management /Bosch. Hrsг.: Robert Bosch GmbH, Unternehmensbereich Kraftfahrzeug-Ausrüstung, Abteilung Technische Informati-on (KH/VDT). Die Deutsche Bibliothek-CIP-Einheits auf-nahme. / K.-O. Riesenberг und andere; Chef-Red. Horst Bauer; aktualisierte und erw. Aufl.-Braunschweig; Wiesba-den: Vieweg, 1998. - 304s. 3. Grehov, L.V. Toplivnaja appa-ratura i sistemy upravlenija dizelej: Uchebnik dlja vu-zov /L.V. Grehov, N.A. Ivawenko, V.A. Markov. - M.: Legi-on Avtodata, 2005. - 344 s. 4. Zenin E.Ju. Rozrobka metodu priskorenogo diagnostuvannja avtomobil'nih dizelev z akumul-

jatornimi sistemami palivopodachi: av-toref. diss. ... kand. tehn. nauk: 05.22.20 / E.Ju. Zenkin. - H.: HNADU, 2009. - 20 s. 5. Vrublevs'kij, O.M. Naukovi osnovi voboru parametriv akumuljatornoj palivnoj apa-raturi z elektronnim keruvannjam dlja visokoobertovogo dizelja: avtoref. diss. ... dokt. tehn. nauk: 05.05.03 / O.M. Vrublevs'kij. - H.: HNADU, 2010. - 36 s. 6. Emel'ja-nov, I.A. Razvitie kompleksa matematicheskikh modelej dizelja, osnawennogo akkumuljatornoj toplivnoj siste-moj s jelektronnym upravleniem: avtoref. dis. ... kand. tehn. nauk.: 05.02.08./ I.A. Emel'janov - M.: MADI (GTU), 2007. - 18 s. 7. Pojda, A.N. Analiz tehničeskogo sostoja-nija toplivnoj apparatury na osnove kolebanij davle-nija topliva v gidroakkumuljatore / A.N. Pojda, E.Ju. Zenkin. Dvigateli vnutrennego sgoranija: 2009. -Vyp. 1. -S. 114-118. 8. Dvigateli vnutrennego sgoranija: Teorija porshnevnyh i kombinirovannyh dvi-gatelej. Učeb-nik dlja studentov vuzov, obučajuvihsja po special'no-sti «Dvigateli vnutrennego sgoranija»/ D. N Vyrubov, N.A Ivawenko, V.I. Ivin i dr.; pod red. A.S. Orlina, M.G. Kruglova. - [4-е изд., перераб. и доп.]. - М.: Mashinostroenie, 1983. - 372с. 9. Крайнюк, А.И. Моделирование движения жидкости в топливных трубопроводах высокого давления дизелей с учетом следа прошедших волн/ А.И. Крайнюк, С.И. Тырловой, В.В. Гладков. Вестник СУДУ.-2000. - №5(27). - С. 133-136.

УДК 621.4-2

**А.Е. Свистула, д-р техн. наук, А.А. Балашов, д-р техн. наук, В.С. Яров, асп.**

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ДВИГАТЕЛЯ С ДОПОЛНИТЕЛЬНЫМ ВЫПУСКОМ ОТРАБОТАВШИХ ГАЗОВ ЧЕРЕЗ ОКНО В ЦИЛИНДРЕ**

### **Постановка задачи исследования**

Повышение мощности двигателей ограничивается тепловой напряженностью деталей, форсировкой по частоте вращения, наполнением цилиндра свежим зарядом, одной из причин которых является рост сопротивления движению газов через органы газообмена. Газообмен 4-тактных поршневых двигателей полностью контролируется и регулируется работой клапанов механизма газораспределения. Использование в дополнение к клапанному гильзового газораспределения, например в работах [1, 2] и др., позволяет снизить сопротивление движению газов через органы газообмена и улучшить наполнение цилиндра. В указанных технических решениях используется подвижный золотник или клапан, закрывающий окна на тактах впуска-сжатия, усложняющий конструкцию, т.е. в известных 4-тактных двигателях окна практически не используются для продувки или дозарядки (рециркуляции) [1, 2].

Целью работы является повышение эффективности работы системы газообмена 4-тактного двигателя. Поставлены задачи разработки экспериментальной системы двойного выпуска отработавших газов (ОГ) через клапаны и окна в цилиндре 4-тактного двигателя с возможностью, в процес-

се исследования, оперативного подбора фазы и сечения выпуска через окна, экспериментально-расчетного исследования расходных характеристик газового тракта и показателей рабочего процесса опытного двигателя на безмоторных и моторных стендах.

### **Экспериментальная установка**

Схема газообмена экспериментального двигателя (рис. 1) обеспечивает выпуск через окна в цилиндре и клапаны, а также на полных нагрузках – продувку в конце выпуска – начале сжатия, на малых нагрузках и холостом ходу – дозарядку цилиндра продуктами сгорания в конце впуска – начале сжатия [3]. Выпуск осуществляется через клапан 1 и через окно 2. Раздвоение потока снижает теплонапряженность головки цилиндра и выпускного клапана 1, облегчает выпуск ОГ. Воздух подается в цилиндр через впускной клапан 3 и вытекает через открытое окно 2 в цилиндре, т.к. давление воздуха в цилиндре больше давления продуктов сгорания в выпускном трубопроводе 4, происходит продувка. На режиме пуска, вследствие обратного заброса повышается температура в конце сжатия, что облегчает пуск. На полных нагрузках снижается теплонапряженность головки вследствие уменьшения потока выпускных газов через клапан и продувки.