

В. Г. Заренбин, Т.Н. Колесникова

РАСЧЕТ УТЕЧКИ ГАЗОВ В ДВС ПРИ ДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ПОРШНЕВЫХ КОЛЕЦ

Предложен расчет утечек газов через кольцевые уплотнения ДВС с учетом динамики поршневых колец. Отмечены недостатки предыдущих работ в этой области. Дана количественная оценка утечек газов через кольцевое уплотнение быстроходного дизеля, которая подтвердила известные ранее экспериментальные зависимости истечения газов от частоты вращения коленчатого вала двигателя. Приведены формулы для расчета утечек газов при различных случаях взаимного расположения колец в канавках поршня. Предоставлено пример расчета утечек для быстроходного дизеля. Отмечено, что по характеру изменения истечения газов от частоты вращения коленчатого вала можно выявить нарушения в нормальной работе поршневых колец и наметить пути совершенствования кольцевого уплотнения. Сделаны достоверные выводы и указаны пути экспериментальной оценки динамической устойчивости кольцевого уплотнения.

Введение

Постановка проблемы. Работа деталей цилиндропоршневой группы (ЦПГ) двигателей внутреннего сгорания сопровождается утечкой газов через систему зазоров в сопряжениях поршневое кольцо (ПК) – поршень (П) – гильза цилиндров (ГЦ). Эти утечки могут оказывать заметное влияние на эксплуатационные свойства ДВС: ухудшаются мощность и экономичность двигателя, форсируется износ деталей, уменьшаются сроки службы, растет расход масла и его старение, возрастает вероятность заедания поверхностей сопряженных деталей [3,5]. В связи с этим проблема улучшения эксплуатационных свойств кольцевого уплотнения ДВС является предметом постоянного внимания и её актуальность приобретает особую остроту для современных форсированных двигателей [1,2].

Исследованию утечек газов в картер двигателя посвящено много работ, в которых в результате анализа экспериментально-теоретических зависимостей даны практически важные рекомендации по конструкторско-технологическому усовершенствованию, а также условиям работы системы ПК-П-ГЦ [3,4,5].

Несмотря на это, различные исследователи при расчете утечек исходили из допущения об отсутствии перемещения колец на работающем двигателе, что неизбежно приводило к увеличению погрешностей их оценки, вследствие чего полученные результаты носили скорее качественный, нежели количественный характер.

Вопросы динамики поршневых колец и её влияния на утечку газов рассматривались в работах [7-13]. Наиболее полно они изложены в работах К. Энглиша [3,4]. В них приведен подробный анализ обширного экспериментального материала по динамическому нарушению уплотняющей способности ПК, вместе с тем в них не приведены аналитические связи между динамикой колец и утечками газов через кольцевое уплотнение. Подобный недо-

статок в равной мере присущ и ряду других работ [7,8,13].

В работе [6] рассмотрена динамическая модель кольцевого уплотнения, позволяющая уточнить теоретический анализ работы ПК и получить расчетные данные по перемещению колец в канавках и давлению газов в заколочных пространствах поршня. Однако в ней не предложены аналитические зависимости между динамическими характеристиками кольцевого уплотнения и количеством утечки газов в картер двигателя.

Цель работы. Разработать расчет утечек газов через кольцевое уплотнение ДВС с учетом динамики поршневых колец, который позволит повысить точность оценки уплотнительной способности и найти пути улучшения его эксплуатационных свойств.

Основной материал. Исследуется кольцевое уплотнение, состоящее из трех колец при различных случаях их взаимного расположения в канавках, получивших экспериментальное подтверждение в работах [3,8-10].

Предпосылки аналитического решения рассматриваемой задачи даны в работе [6], где при известных экспериментальных и теоретических допущениях приведены расчетные зависимости для определения положения поршневых колец в канавках и давления газов в заколочных пространствах при аналогичной схеме кольцевого уплотнения.

Утечки газов через неплотности поршневых колец подсчитывались по общеизвестной формуле:

$$dm = \mu f \psi p_k \sqrt{\frac{1}{RT_k}} dt,$$

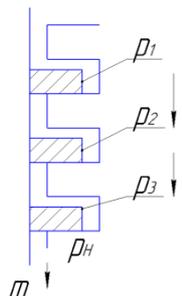
где μf - коэффициент расхода и проходные сечения между заколочными объёмами;

ψ - скоростная функция, зависящая от отношения давлений;

p_k, T_k - давление и температура газов в канавках, R - газовая постоянная, t - время.

Для различных случаев взаимного расположения колец в канавках получены следующие расчётные уравнения:

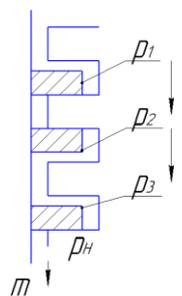
Случай 1.



$\Sigma P_1 > 0, \Sigma P_2 > 0, \Sigma P_3 > 0$
при $p_1 > p_2 > p_3$

$$\frac{dm}{d\tau} = \mu_3 f_3 \cdot \Psi \left(\frac{p_n}{p_3} \right) p_3 \sqrt{\frac{1}{RT_3}} \quad (1)$$

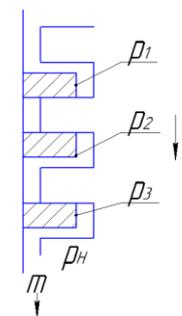
Случай 2.



$\Sigma P_1 > 0, \Sigma P_2 < 0, \Sigma P_3 > 0$
при $p_1 > p_2 = p_3$

$$\frac{dm}{d\tau} = \mu_3 f_3 \cdot \Psi \left(\frac{p_n}{p_3} \right) p_3 \sqrt{\frac{1}{RT_3}} \quad (2)$$

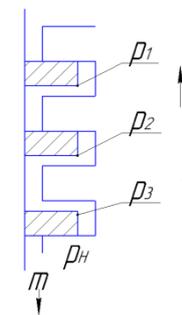
Случай 3.



$\Sigma P_1 > 0, \Sigma P_2 < 0, \Sigma P_3 < 0$
при $p_1 > p_2 > p_3$

$$\frac{dm}{d\tau} = \mu_3 f_3 \cdot \Psi \left(\frac{p_n}{p_2} \right) p_2 \sqrt{\frac{1}{RT_2}}$$

Случай 4.



$\Sigma P_1 < 0, \Sigma P_2 < 0, \Sigma P_3 > 0$
при $p_1 < p_2 > p_3$

$$\frac{dm}{d\tau} = \mu_3 f_3 \cdot \Psi \left(\frac{p_n}{p_3} \right) p_3 \sqrt{\frac{1}{RT_3}}$$

где $\Sigma P_1, \Sigma P_2, \Sigma P_3$ – суммы сил, действующих на первое, второе и третье поршневые кольца;

p_1, p_2, p_3 – соответственно, давление газов в первой, второй и третьей поршневых канавках;

T_2, T_3 – температуры газов во второй и третьей канавках, равные среднеарифметической температуре поршня в зоне канавок и гильзы цилиндра; p_n – давление за третьим поршневым кольцом.

Значения p_1, p_2, p_3 , а также расположение поршневых колец в канавках определяются расчётно-экспериментальным методом, изложенным в работе [6].

В качестве примера расчета утечки газов был выбран дизель ($n=2600 \text{ мин}^{-1}, Ne=155 \text{ кВт}$). Основными исходными данными для расчета были: величины проходных сечений между заколочными объемами $\mu f_2 = \mu f_3 = 0,310^{-6} \text{ м}^2$; объёмы заколочных пространств – $V_2 = V_3 = 1,73 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$.

Задание начальных и граничных условий проведено по результатам индицирования и термометрирования дизеля на номинальном режиме работы. Коэффициент расхода μ принят согласно рекомендациям работ [8,9].

Для обобщения результатов исследований целесообразно переходить к относительным величинам утечек:

$$\bar{m}_\varphi = \frac{m_\varphi}{m_\psi} \quad \text{и} \quad \bar{m}_n = \frac{m_n}{m_{\min}}$$

где, m_φ – текущая утечка газов по углу поворота коленчатого вала, m_ψ – суммарная утечка газов за цикл, m_n – суммарная утечка при заданной частоте вращения коленчатого вала, m_{\min} – минимальная суммарная утечка газов по зависимости $m_n = f(n)$, $\bar{m}_\varphi, \bar{m}_n$ – относительные величины утечек.

На рис.1 предоставлены \bar{m}_φ в зависимости от угла поворота коленчатого вала ($n=800 \text{ мин}^{-1}$) при неподвижных и подвижных кольцах в канавках поршня. Видно, что перемещения колец в канавках оказывают значительно влияние на утечку газов в картер двигателя, причем основные различия в утечках газов происходят в периоды, когда давление газов в камере сгорания являются наибольшими, т.е. приблизительно при $360-540^\circ$ поворота коленчатого вала. На последнем участке (с 660° поворота коленчатого вала) разница в величинах утечек не превышает 5% от общей утечки за цикл.

Следовательно, при расчете утечек необходимо учитывать действительные условия течения газов в уплотнении, образованном перемещающимися в канавках поршневыми кольцами.

Характер зависимости \bar{m}_n от частоты вращения коленчатого вала показан на рис.2. Для сравнения на графике приведены зависимости относительных утечек при неподвижных кольцах, а также для режимов холостого хода.

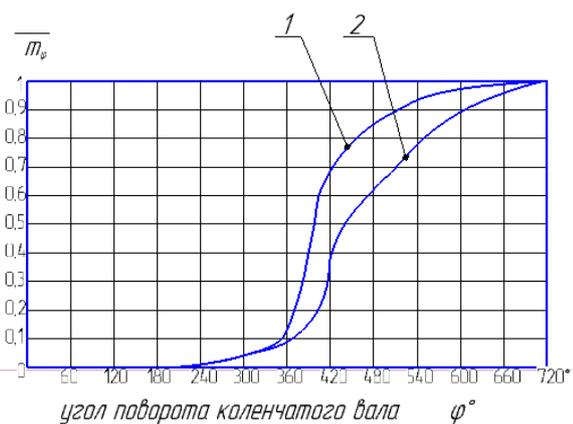


Рис. 1. Характер изменения относительной утечки газов \bar{m}_p в зависимости от угла поворота коленчатого вала ($n=800\text{мин}^{-1}$):

1 - с учетом перемещения колец в канавках;
2 - при неподвижных кольцах

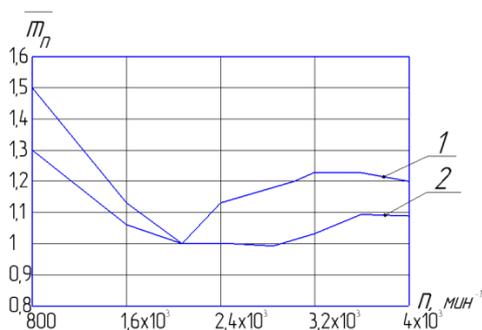


Рис.2. Характер изменения относительной утечки газов \bar{m}_n в зависимости от частоты вращения коленчатого вала:

1 – на режимах холостого хода;
2 – на режимах нагрузки

Анализ приведенных зависимостей подтверждает существенное влияние перемещения колец на характер протекания кривых утечек газов. То, что утечки газов могут переходить через минимум при увеличении частоты вращения, отмечалось ранее и другими исследователями [3]. В нашем случае, динамические нарушения в работе колец происходили при частоте вращения более 2000мин^{-1} , т.е. тогда, когда в начале второе кольцо начинало перемещаться в канавке поршня, а затем и остальные.

Как показали наши расчеты [6], переход к «критической» частоте вращения особо заметен на режимах холостого хода из-за уменьшения сил давления газов, действующих на поршневые кольца, что способствовало их отрыву от посадочной поверхности на нижнем торце канавки поршня.

Таким образом, располагая данными о характере зависимости утечек газов в картер от частоты

вращения коленчатого вала, можно судить о динамических качествах кольцевого уплотнения и его газуплотнительной способности, что важно при дальнейшем совершенствовании и форсировании современных ДВС.

Выводы

1. Разработан расчет утечек газов через кольцевое уплотнение ДВС с учетом динамики поршневых колец, что даёт возможность повысить точность оценки уплотнительной способности и изыскать пути улучшения их эксплуатационных свойств.

2. Приведены формулы для расчета утечек газов при различных случаях взаимного расположения колец в канавках поршня.

3. Дан пример расчета утечек газов через кольцевое уплотнение быстроходного дизеля, результаты которого подтвердили приведенные ранее различными исследователями экспериментальные зависимости утечек газов от частоты вращения коленчатого вала двигателя.

4. По характеру изменения утечек газов от частоты вращения коленчатого вала двигателя, особенно на режимах холостого хода, можно выявить нарушения в работе колец и сделать заключение о динамической устойчивости кольцевого уплотнения и, прежде всего, второго компрессионного кольца. Именно эту информацию важно учитывать при совершенствовании кольцевого уплотнения форсированных двигателей.

Список литературы:

1. Марченко А.П. Двигуни внутрішнього згорання; серія підручників у 6 томах. Т.1. Розробка конструкцій форсованих двигунів наземних транспортних машин / А.П. Марченко, М.К. Рязанцев, А.Ф. Шеховцова: за ред. А.П. Марченко та проф. А.Ф. Шеховцова. — Харків: Прапор, 2004. — 384с.
2. Абрамчук Ф.І. Двигуни внутрішнього згорання; серія підручників у 6 томах. Т.6. Надійність ДВЗ/ Ф.І. Абрамчук, М.К. Рязанцев, А.Ф. Шеховцова: за ред. А.П. Марченко та проф. А.Ф. Шеховцова. — Харків: Видавн. центр НТУ «ХПІ», 2004. — 324с.
3. Энгелис К. Поршневые кольца. Т.1. Теория, изготовление, конструкция и расчет / К. Энгелис. — Москва: Машигиз, 1962. — 584с.
4. Энгелис К. Поршневые кольца. Т.2. Эксплуатация и испытания /К. Энгелис. — Москва: Машигиз, 1963. — 386 с.
5. Устинов А.Н. Исследование поршневых колец дизелей /А. Устинов. — Саратов: издательство Саратовского университета, 1974. — 127с.
6. Заренбин В.Г. К расчету течения газов через кольцевые уплотнения ДВС с учетом динамики поршневых колец / В.Г. Заренбин, Т.Н. Колесникова // Двигатели внутреннего сгорания. — 2017. - №1. — с. 27-33.
7. Dykes P. Piston ring Movement during blow-by in high speed petrol engines // I nst. Mech Engrs, 1948. — v. 2.- №71.— p.140 -151.
8. Furuhama S., Tada T. On the of Gas Through the Piston Rings (2 nd Report)// Bulletin of JSME, 1961. — v.4. - №16. — p. 691 – 698.
9. Furuhama S., Tada T. On the Flow of Gas Through the Piston Rings (1 nd Report)// Bulletin of JSME, 1961. — v.4. - №16. — p. 684 – 690.
10. Furuhama S., Hiruma M: Axiul

movement of piston rings in the groove // ASLE/ Prepr, 1972. - №12 -10pp. 11. Baker A.J.S., Dowson D., Economu P. Dynamic factors related to piston ring scuffing//ISME, 1976. – p. 25-34. 12. Baker A.J.S., Dowson D., Strachen P. Dynamic operating factors in piston rings// International symposium on Marine engineering (ISME), Tokio, 1973. – p. 267- 282. 13. Truscott R., Reid T., Ruddy B. Ring dynamics in a diesel engine and its effects on oil consumption and blowby // SAE Techn. Paper series, 1983. - №831282. – p. 11-23.

Bibliography (transliterated):

1. Marchenko. A. P., Ryzantsev. M. K., Shehovtsov. A. F., (2004), *Engines of internal combustion. [Dviguni vnutrishnogo zgoraniya]: seriya pidruchnikov u 6 tomah. T.1. Development of constructions of forced engines of ground transport vehicles. [Rozrobka konstrukcij forsovanih dviguniv nazemnih transportnih mashin], Kharkiv, 384p.*
 2. Abramchuk, F.I., Ryzantsev, M. K., Shehovtsov, A. F., (2004), *Engines of internal combustion. [Dviguni vnutrishnogo zgoraniya]: seriya pidruchnikov u 6 tomah. T.6. Reliability of the EIC [Nadijnist DVZ], Kharkiv, 324p.*
 3. English, K., (1962), *Piston rings. [Porsh-*

nevie kolca] in 2 volumes. V.1. Mechanical Engineering, 584p. 4. English K. Piston rings. [Porshnevie kolca] in 2 volumes. V.2 [Ekspluatatsiya i ispitaniya], Mechanical Engineering, 368p. 5. Ustinov A.N. Research of piston rings of diesel engines. 1974, [Issledovanie porshnevih kolec], Saratov, 127p.6. Zarenbin V. G., Kolesnikova T. N., To the calculation of the flow of gases through the O-ring seals taking into account the dynamics of the piston rings.2017, [K raschetu techeniya gazov cherez kolcevie uplotneniya DVZ s uchetom dinamiki porshnevih kolec],27-33 pp. 7. Dykes P. Piston ring Movement during blow-by in high speed petrol engines // 1 nst. Mech Engrs, 1948. – v. 2.- №71 p.140 -151.8. Furuhamas S., Tada T. On the of Gas Through the Piston Rings (2 nd Report)// Bulletin of JSME, 1961. – v.4. - №16. – p. 691 – 698.9. Furuhamas S., Tada T. On the Flow of Gas Through the Piston Rings (1 nd Report)// Bulletin of JSME, 1961. – v.4. - №16. – p. 684 – 690. 10. Furuhamas S., Hiruma M: Axial movement of piston rings in the groove // ASLE/ Prepr, 1972. - №12 -10pp. 11. Baker A.J.S., Dowson D., Economu P. Dynamic factors related to piston ring scuffing//ISME, 1976. – p. 25-34.12. Baker A.J.S., Dowson D., Strachen P. Dynamic operating factors in piston rings// International symposium on Marine engineering (ISME), Tokio, 1973. – p. 267- 282. 13. Truscott R., Reid T., Ruddy B. Ring dynamics in a diesel engine and its effects on oil consumption and blowby // SAE Techn. Paper.

Надійшла в редакцію 13.07.2018 р.

Заренбін Володимир Георгійович – докт. техн .наук, професор кафедри експлуатації та ремонту машин Придніпровської державної академії будівництва та архітектури, Дніпропетровськ, Україна, e-mail: zvg@mail.pgasa.dp.ua.

Колеснікова Тетяна Миколаївна – канд. техн. наук, доцент кафедри експлуатації та ремонту машин Придніпровської державної академії будівництва та архітектури, Дніпропетровськ, Україна, e-mail: tnk1403@ukr.net.

РОЗРАХУНОК ВИТОКУ ГАЗІВ В ДВЗ ПРИ ДИНАМІЧНІЙ МОДЕЛІ ФУНКЦІОНУВАННЯ ПОРШНЕВИХ КІЛЕЦЬ

V.G. Zarenbin, T.M. Kolesnikova

Запропоновано розрахунок витоків газів через кільцеві ущільнення ДВЗ з урахуванням динаміки поршневих кілець. Відзначені недоліки попередніх робіт в цій галузі. Дана кількісна оцінка витоків газів через кільцеве ущільнення швидкохідного дизеля, яка підтвердила відомі раніше експериментальні залежності витоків газів від частоти обертання колінчастого вала двигуна. Наведено формули для розрахунку витоків газів при різних випадках взаємного розташування кілець в канавках поршня. Надано приклад розрахунку витоків для швидкохідного дизеля. Відзначено, що за характером зміни витоків газів від частоти обертання колінчастого вала можна виявити порушення в нормальній роботі поршневих кілець і намітити шляхи вдосконалення кільцевого ущільнення. Зроблені достовірні висновки і вказані шляхи експериментальної оцінки динамічної стійкості кільцевого ущільнення.

CALCULATION OF THE LEAKAGE OF GASES IN THE INTERNAL COMBUSTION ENGINE UNDER THE DYNAMIC MODEL OF THE FUNCTIONING OF PISTON RINGS

V.G.Zarenbin, T.N. Kolesnikova

The calculation of gas leaks through the ring seals of the internal combustion engine taking into account the dynamics of the piston rings is proposed. The shortcomings of previous works in this field are noted. A quantitative estimate of the leakage of gases through the ring seal of a high-speed diesel engine, which confirmed the previously known experimental dependence of the leakage of gases on the engine speed of the crankshaft. Formulas for the calculation of gas leaks are given for different cases of mutual arrangement of rings in the grooves of the piston. An example of leakage calculation for a high-speed diesel is given. It is noted that the nature of the change in gas leaks from the rotational speed of the crankshaft can reveal irregularities in the normal operation of the piston rings and outline ways to improve the ring seal. Authentic conclusions are drawn and ways of experimental evaluation of the dynamic stability of the ring seal are indicated.