

УДК 62-144.4

DOI: 10.22213/2410-9304-2020-1-15-19

Исследование повышения эффективности охлаждения двухтактных двигателей с использованием телеметрической системы измерения температуры поршня

В. А. Куликов, доктор технических наук, профессор, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

В. Н. Сяктерев, кандидат технических наук, доцент, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

В. В. Сяктерева, кандидат технических наук, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

В работе предложен метод повышения эффективности охлаждения двигателей с воздушным охлаждением с использованием интенсификации теплообмена на охлаждающих поверхностях цилиндров с применением турбулизаторов. Турбулизаторы выполнены в виде круглых выступов на поверхности ребер рубашки охлаждения цилиндров перпендикулярно потоку охлаждающего воздуха. Возникаемые за этими выступами вихревые зоны служат источником дополнительной турбулизации и способствуют интенсификации теплообмена. Исследование влияния турбулизаторов на повышение эффективности охлаждения основано на использовании метода термометрирования поршня с помощью телеметрической системы измерений с оптическим каналом связи. В данном эксперименте производится непосредственное термометрирование поршня и при этом исключаются дополнительные погрешности, связанные с искажением теплообмена на охлаждающих поверхностях цилиндра двигателя, возникающие при непосредственном измерении температур ребер цилиндра двигателя в различных точках. Сравнительные испытания серийного и опытного двигателя с рубашкой охлаждения с турбулизаторами показали снижение температуры от 3 до 8 градусов в различных точках поршня, что снижает общий уровень его теплонпряженного состояния, позволяет отказаться от трудоемкого процесса алитирования и снижает себестоимость двигателя. Применение эффективности охлаждения двигателей на основе интенсификации теплообмена с использованием турбулизаторов может быть использовано для повышения надежности работы двигателей мотоциклов и современных беспилотных летательных аппаратов с воздушным охлаждением, что дополнительно может снизить уровень шума этих аппаратов.

Ключевые слова: двигатель внутреннего сгорания, воздушное охлаждение, телеметрическая система измерения, тепловое состояние поршня.

Введение

Неизменной тенденцией совершенствования двигателей внутреннего сгорания (ДВС) является увеличение удельной мощности при одновременном повышении их экономичности, надежности и ресурса. Однако форсирование двигателей приводит к росту уровня теплонпряженности деталей цилиндропоршневой группы (ЦПГ) и требует существенного улучшения их конструкции и совершенствования характеристик рабочего процесса.

Повышение эффективности охлаждения ДВС с воздушным охлаждением, главным образом, связано с оптимизацией оребрения цилиндров и головок двигателя, поскольку для этих ДВС это является одним из основных путей повышения их долговечности и надежности. Для решения этой задачи разрабатываются различные методы экспериментального и численного исследования теплообмена и гидродинамики потока на ребрах и по образующей цилиндра двигателя.

Цель настоящего исследования – оптимизация системы воздушного охлаждения двигателя внутреннего сгорания с использованием турбулизации охлаждающего потока воздуха.

Под оптимизацией оребрения подразумевается определение экспериментальным или аналитическим путем наиболее оптимальных соотношений размеров охлаждающего оребрения, например, толщины основания охлаждающего ребра, высоты ребра, ширины межреберного зазора.

Обычно используются прямые или круглые ребра прямоугольного, треугольного или трапециевидального сечения. Толщина ребра должна быть по возможности минимальной с целью экономии металла. Для увеличения охлаждающей поверхности расстояние между двумя соседними ребрами и ширина межреберного зазора выбираются из условия размещения максимального числа ребер. Однако с уменьшением межреберного зазора усиливается воздействие пограничного слоя, образующегося на поверхности ребра, на течение теплоносителя в межреберных каналах. В результате этого возрастают гидравлические потери при обтекании ребер и может уменьшиться скорость течения теплоносителя в межреберных каналах, что приводит к уменьшению коэффициента теплоотдачи и снижению эффективности оребрения [1, 2].

В связи с этим исследование применения новых конструктивных решений в системе охлаждения ДВС с воздушным охлаждением является одним из путей повышения их надежности и долговечности.

Повышение эффективности воздушного охлаждения

В известной работе [3] по результатам термометрирования двигателя ИЖ-Юпитер проводился анализ эффективности воздушного охлаждения двухцилиндровых двигателей при различных сочетаниях геометрических размеров радиаторов охлаждения, то есть для различных значений толщины основания ребра, высоты ребра и ширины межреберного зазора. Показано, что наилучший коэффициент эффективности оребрения имеет рубашка охлаждения мотоциклетного двигателя Юпитер-2.

Для данной цилиндропоршневой группы проведены исследования повышения эффективности охлаждения двигателя за счет интенсификации теплообмена в межреберных каналах путем искусственной турбулизации охлаждающего потока воздуха. Испытаниям подвергались серийные двигатели, цилиндр одного из которых был изготовлен с применением технологической операции алитирования «альфин-процесса», а второго – с запрессовкой гильзы цилиндра в рубашку охлаждения без применения алитирования. При изготовлении цилиндра с применением алитирования между поверхностью чугунной гильзы и алюминиевой рубашкой охлаждения располагается тонкий переходной слой, где молекулы железа и алюминия находятся в непосредственном контакте. Как показано в работе [4], применение технологической операции алитирования позволяет значительно снизить термическое сопротивление между чугунной гильзой двигателя и алюминиевой рубашкой охлаждения, что в целом снижает уровень температур деталей цилиндропоршневой группы двигателя, но процесс алитирования является достаточно дорогостоящей и трудоемкой технологической операцией. Поэтому сравнение эффективности влияния турбулизаторов на охлаждения двигателя с разной технологией изготовления цилиндров является актуальным.

Турбулизация потока в межреберных каналах реализовывалась за счет формирования на ребрах рубашки охлаждения плавных выступов – турбулизаторов, ось которых перпендикулярна набегающему воздушному потоку охлаждения. Взаимное расположение турбулизаторов в виде круглых выступов показано на сечении ребер охлаждения (рис. 1).

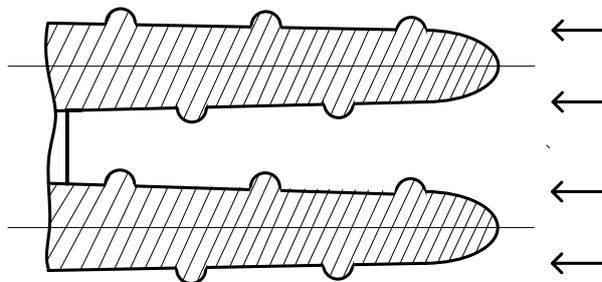


Рис. 1. Расположение турбулизаторов на ребрах охлаждения

Высота турбулизаторов выполняется равной толщине пограничного слоя, при этом возникающие за этими выступами вихревые зоны служат источниками дополнительной турбулизации и способствуют уменьшению пограничного слоя. Учитывая сложность определения толщины пограничного слоя в межреберном пространстве работающего двигателя как аналитическим, так и экспериментальным путем [5–8], для оценки эффективности применения турбулизаторов на работающем двигателе проводили непосредственное термометрирование поршня с использованием системы измерения температуры поршня с оптическим каналом связи [9]. Такой подход к исследованию позволил также избежать дополнительных искажений к протеканию охлаждающего потока воздуха в межреберных каналах, возникающих при проведении непосредственного термометрирования ребер охлаждения путем измерения распределения температур в основании ребра и по его высоте с использованием достаточно большого количества датчиков температуры прокладываемых по поверхности ребер охлаждения.

Схема установки датчиков температуры на поршне двигателя приведена на рис. 2.

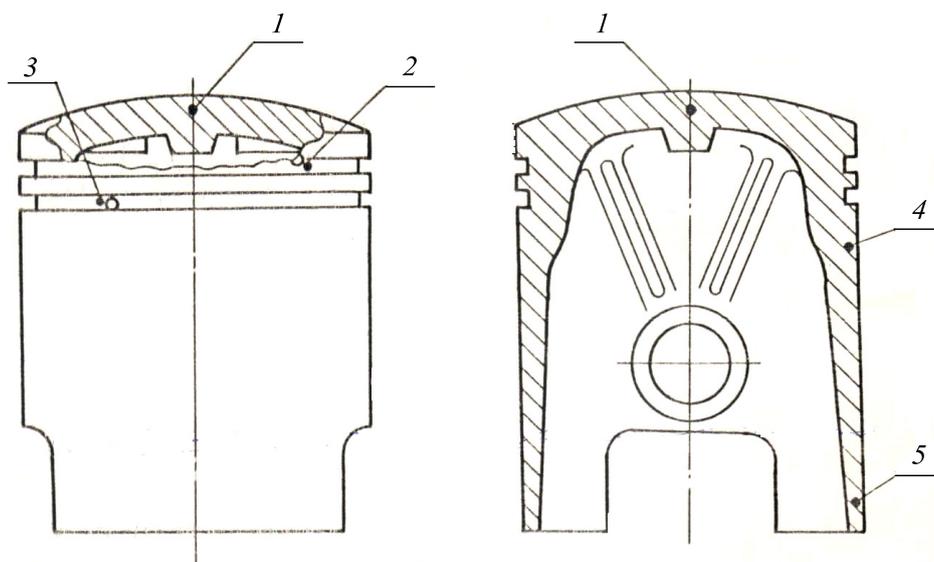


Рис. 2. Схема установки датчиков температуры на поршне двигателя

В качестве датчиков в системе измерения температуры поршня использовались полупроводниковые терморезисторы (термисторы) типа СТ1-19, применение которых в подобных системах и анализ возникающих погрешностей обоснован в работе [10].

Измерения температур поршня производились в центре днища под уплотнительными кольцами и по образующей поверхности юбки поршня, так как температура в этих точках является характерной для теплового состояния двигателя в целом [11, 12]. Чрезмерно высокая температура уплотнительного кольца приводит к нагару масла в канавке кольца, закоксовыванию и, следовательно, к залеганию кольца. Повышается нагрузка на другое кольцо, и теряется герметичность камеры сгорания, через кольца прорываются отработанные газы, нарушая смазку поршня, что приводит к увеличению силы трения и к еще большему увеличению температуры поршня, впоследствии к его заклиниванию или задирам.

Термисторы заделывались в глухое отверстие на заданную глубину чувствительного элемента и заклеивались высокотемпературным компаундом УП5-207 с наполнителем из алюминиевой пудры. Выводы термисторов прокладывались по внутренней поверхности поршня и подводились к входам промежуточного преобразователя системы измерений, расположенного на поршне.

Испытаниям подвергался серийный поршень двигателя Юпитер-2, который последовательно устанавливался в стандартный цилиндр, изготовленный с применением алитирования, и в цилиндр с рубашкой охлаждения, оснащенный турбулизаторами и изготовленный запрессовкой гильзы в рубашку охлаждения. Поршень и цилиндры подбирались по группам в соответствии с технологией комплектации деталей цилиндропоршневой группы двигателей. Измерения проводились как на установившемся режиме работы двигателя, соответствующем движению мотоцикла с боковым прицепом со скоростью 70 км/ч, так и на переходных режимах, соответствующих разной мощности двигателя.

Результаты измерений температуры поршня на установившемся режиме для обоих цилиндров приведены в табл. 1, а динамика изменения температуры в точке 4 – на рис. 3.

Таблица 1. Результаты измерения температуры поршня

№ точки	Тип двигателя	
	Серийный Температура поршня, °С	Опытный Температура поршня, °С
1	286	283
2	256	251
3	246	238
4	196	190
5	110	105

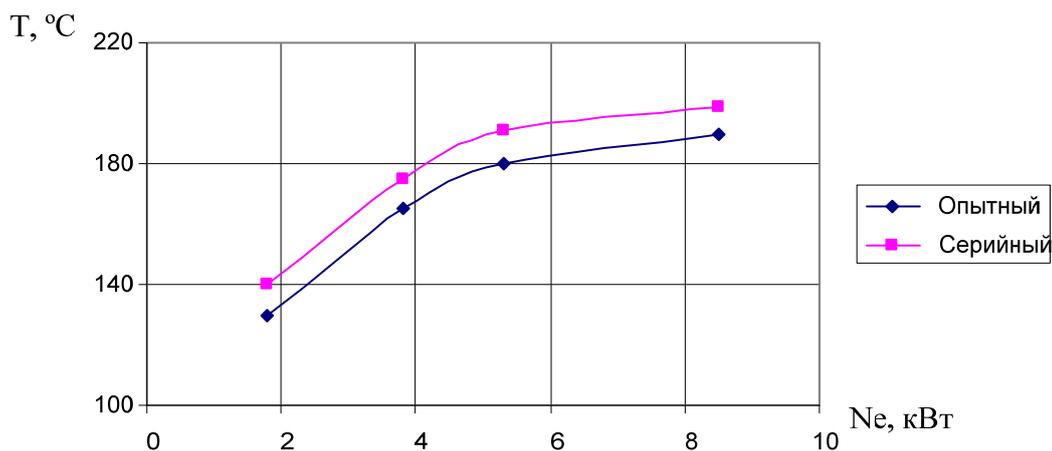


Рис. 3. Динамика изменения температуры в точке 4

Как видно из таблицы, уровень температур поршня двигателя с серийным цилиндром несколько выше во всех точках измерения, чем температуры поршня двигателя с рубашкой охлаждения, снабженной турбулизаторами. Значительная разница наблюдается под вторым уплотнительным кольцом и для обоих двигателей близка к предельному значению, так как при достижении температуры 230–245 °С для масел, применяемых в мотодвигателях с воздушным охлаждением, начинается интенсивный процесс лакообразования масел, что может привести к закоксовыванию поршневых колец, к снижению их подвижности, что резко ухудшает работоспособность деталей цилиндропоршневой группы.

Анализ результатов изменения температуры в точке 4 в зависимости от режима работы двигателя также показывает, что температура поршня двигателя с рубашкой охлаждения, оснащенной турбулизаторами, ниже, чем у серийного, несмотря на отсутствие операции алитирования при изготовлении цилиндра.

Заключение

Таким образом, можно констатировать, что введение турбулизаторов на охлаждающие ребра цилиндра двигателя позволяет повысить эффективность охлаждения двигателей с воздушным охлаждением.

Для снижения уровня температур поршня необходимо также ввести оребрение днища поршня с внутренней стороны, что существенно повысит площадь охлаждающей поверхности и будет способствовать снижению общего уровня температурного состояния поршня.

В связи с этим проведенные исследования позволяют наметить пути оптимизации геометрии оребрения охлаждающих поверхностей двигателей с воздушным охлаждением, применение ко-

торых актуально с развитием беспилотных летательных аппаратов при повышении их надежности и снижения уровня шума, что является актуальным в дальнейшем исследовании применения турбулизаторов.

Библиографические ссылки

1. Ройзен Л. И., Дулькин И. Н. Тепловой расчет оребренных поверхностей. М. : Энергия, 1977. 256 с.
2. Кавадзэ Р. З. Локальный теплообмен в поршневых двигателях. М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2016. 515 с.
3. Сяктерев В. Н., Корепанов Е. В. Расчетно-экспериментальное исследование эффективности оребрения двигателя «ИЖ-Юпитер» // Известия вузов. Машиностроение. 1990. № 6. С. 48–50.
4. Ключников Г. М., Изметинский Н. Л., Сяктерев В. Н. Применение алитирования при изготовлении цилиндров мотоциклетных двигателей // Экспресс-информация: Мотовелопромышленность. 1980. № 6. С. 14–16.
5. Галуцак И. В. Теплоотдача поперечно-обтекаемых шахматных пучков труб с просечным спирально-ленточным оребрением // Энергоснабжение. Энергетика. Энергоаудит. 2014. № 1 (119). С. 27–29.
6. Овсянник А. В. Расчет оребренных поверхностей теплообмена при кипении на них жидкостей // Вестник ГГТУ им. П.О. Сухого. 2012. № 4. С. 47–51.
7. FaJiang H., WeiWu C., Ping Y. Experimental Investigation of Heat Transfer and Flowing Resistance for Air Flow Cross over Spiral Finned Tube Heat Exchanger. Energy Procedia 17. 2012, pp. 741-749.
8. Kocurek R., Adamiec J. Manufacturing technologies of finned tubes // Advances in materials science. Vol. 13. No. 3 (37), September 2013, pp. 26-36.
9. Куликов В. А., Сяктерев В. Н., Сяктерева В. В. Исследование влияния методических погрешностей на точность измерения температуры подвижных деталей двигателей с использованием телеметрических систем измерения // Вестник Ижевского государст-

венного технического университета имени М.Т. Калашникова. 2014. № 4 (64). С. 118–121.

10. Там же.

11. Костин А. К., Ларионов В. В., Михайлов Л. И. Теплонапряженность двигателей внутреннего сгорания. Л. : Машиностроение. Ленинградское отделение, 1979. 223 с.

12. Закомолдин И. И. Методологические основы проектирования систем воздушного охлаждения поршневых двигателей внутреннего сгорания : дис. ... д-ра техн. наук. Барнаул, 2010. 414 с.

References

1. Roizen L.I., Dul'kin I.N. *Teplovoi raschet orebrennykh poverkhnostei* [Thermal calculation of finned surfaces]. Moscow, Energiya Publ., 1977, 256 p. (in Russ.).

2. Kavtaradze R.Z. *Lokal'nyi teploobmen v porshnevnykh dvigatelyakh* [Local heat exchange in piston engines]. Moscow, MGTU im. N.E. Bauman Publ., 2016, 515 p. (in Russ.).

3. Syakterev V.N., Korepanov E.V. [Calculation and experimental study of the efficiency of the finning of the engine «IZH-Jupiter»]. *Izvestiya vuzov. Mashinostroenie*, 1990, no. 6, pp. 48-50. (in Russ.).

4. Klyuchnikov G.M., Izmetinskii N.L., Syakterev V.N. [The application of aluminizing in the manufacture of cylinders of motorcycle engines]. *Ekspress-informatsiya: Motovelopromyshlennost'*, 1980, no. 6, pp. 14-16. (in Russ.).

5. Galushchak I.V. [Heat transfer of cross-streamlined checkered bundles of pipes with slotted spiral-ribbon fins]. *Energosnabzhenie. Energetika. Energoaudit*, 2014, no. 1 (119), pp. 27-29. (in Russ.).

6. Ovsyannik A.V. [Calculation of finned heat exchange surfaces when liquids boil on them]. *Vestnik GGTU im. P.O. Sukhogo*, 2012, no. 4, pp. 47-51. (in Russ.).

7. FaJiang H., WeiWu C., Ping Y. Experimental Investigation of Heat Transfer and Flowing Resistance for Air Flow Cross over Spiral Finned Tube Heat Exchanger. *Energy Procedia* 17. 2012, pp. 741-749.

8. Kocurek R., Adamiec J. Manufacturing technologies of finned tubes // *Advances in materials science*. Vol. 13. No. 3 (37). September 2013, pp. 26-36.

9. Kulikov V.A., Syakterev V.N., Syaktereva V.V. [Research of influence of methodical errors on accuracy of measurement of temperature of mobile details of engines with use of telemetric systems of measurement]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, 2014, no. 4, pp. 118-121 (in Russ.).

10. Ibid.

11. Kostin A.K., Larionov V.V., Mikhailov L.I. *Teplonapryazhennost' dvigatelei vnutrennego sgoraniya* [Heat stress of internal combustion engines]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1979, 223 p. (in Russ.).

12. Zakomoldin I.I. *Metodologicheskie osnovy proektirovaniya sistem vozdušnogo okhlazhdeniya porshnevnykh dvigatelei vnutrennego sgoraniya* [Methodological bases of design of air cooling systems for piston internal combustion engines]: PhD thesis. Barnaul, 2010. 414 p. (in Russ.).

Research on Improvement of Cooling Efficiency of Two-Stroke Engines Using the Telemetric System for Measuring the Piston Temperature

V. A. Kulikov, DSc in Engineering, Professor, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

V. N. Syakterev, PhD in Engineering, Associate Professor, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

V. V. Syaktereva, PhD in Engineering, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

In this paper we propose a method for improving the cooling efficiency of air-cooled engines using heat-transfer enhancement on cooling surface of cylinders using turbulators. The turbulators are made in the form of round protrusions on the surface of the fins of the cylinders' cooling jacket perpendicular to the flow of cooling air. The eddy zones that occur behind these protrusions serve as a source of additional turbulization and contribute to the heat-transfer enhancement. The study on the effect of turbulators on improvement of the cooling effectiveness is based on the use of the thermomentering of the piston method using a telemetry system of measurement with an optic communication channel. In this experiment, direct thermomentering of the piston is performed and at the same time complementary errors related to the distortion of heat exchange on the cooling surfaces of engine cylinder that occur when the temperature of the engine cylinder fins is directly measured at different points are excluded. Comparative tests of a stock and prototype engine with a cooling jacket with turbulators showed a reducing temperature from 3 to 8 degrees at various points of the piston, which reduces the overall level of its high-heat state, allows for abandoning the labor-intensive process of alitizing and it cuts the engine cost. The application of engine cooling efficiency based on heat-transfer enhancement using turbulators can be used to improve the operating reliability of motor-cycle engines and modern air-cooled drones, which can further reduce the noise factor of these vehicles.

Keywords: internal combustion engine, air cooling, telemetry measurement system, thermal state of the piston.

Получено: 04.02.2020