

## АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛООБМЕНА В КАМЕРАХ СГОРАНИЯ АВИАЦИОННЫХ ПОРШНЕВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ С ИСКРОВЫМ ЗАЖИГАНИЕМ

А.А. Зеленцов

zelentsov.aa@gmail.com

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

---

### Аннотация

Рассмотрены особенности локального теплообмена в авиационных поршневых двигателях с воспламенением от электрической искры при реализации индивидуальных моментов включения свечей зажигания, а также интенсивной закрутки потока на впуске. Отмечена необходимость учета реальной геометрии камеры сгорания (выточки под клапаны и форма вытеснителя на поршне, камера в головке двигателя). Численное исследование проведено при использовании трехмерных нестационарных уравнений энергии, движения, диффузии и неразрывности в форме Рейнольдса, дополненных  $(k-\zeta-f)$ -моделью турбулентности. Моделирование проводилось с помощью трехмерного программного пакета AVL FIRE. Определены локальные тепловые потоки, а также коэффициенты теплоотдачи и температуры газа с учетом вытеснителя и выточек под клапаны. Выявлена возможность снижения на 10...15 % тепловых нагрузок на детали камеры сгорания при индивидуальном срабатывании свечей зажигания с максимальным интервалом в  $5^\circ$  поворота коленчатого вала

### Ключевые слова

Авиационный поршневой двигатель, рабочий процесс, локальный теплообмен, математическое моделирование

Поступила в редакцию 12.05.2017  
© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018

---

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант №15-08-01238-а)*

**Цель исследования.** Авиационные поршневые двигатели (АПД) в настоящее время занимают нишу силовых установок для авиации общего назначения и беспилотных летательных аппаратов. Для выполнения жестких требований по массе и минимизации расхода топлива требуется постоянное улучшение процессов смесеобразования и сгорания топливовоздушной смеси в цилиндре двигателя. С этой целью, например, осуществляется организация индивидуальных моментов срабатывания свечей зажигания и интенсификация вихревого движения свежего заряда за счет формы впускных каналов в головной части двигателя. Все это оказывает непосредственное влияние на локальные процессы теплообмена в камере сгорания (КС) двигателя, определяющие в конечном счете его работоспособность.

Указанные обстоятельства обуславливают необходимость детального изучения внутрицилиндровых процессов, в особенности локального теплообмена, в авиационных поршневых двигателях различных схемных и конструктивных исполнений, что и явилось целью настоящей работы.

**Математическая модель.** Математическая модель нестационарных процессов переноса количества движения, энергии, массы и концентрации реагирующих веществ в расчетном объеме подробно описана в [1, 2].

Для решения системы уравнений используется осреднение параметров потока жидкости (газа), при котором плотность  $\rho$  играет роль весового коэффициента (осреднение по Фавру). Получившаяся система уравнений замыкается ( $k-\zeta-f$ )-моделью турбулентности, которая вблизи твердых поверхностей (стенок КС) дополняется пристеночными функциями. Стандартный их вид предусматривает определение универсальной безразмерной скорости  $u^+$  и температуры  $T^+$  как функции от универсальной координаты  $y^+$  в пределах  $y^+ \leq 11,63$  [3].

Влияние химического процесса горения учитывается с помощью интенсивности внутреннего источника теплоты  $q_v$  и массового расхода  $\dot{m}$ . Значения этих параметров могут быть вычислены с помощью скорости  $w_r$  химической реакции сгорания:

$$q_v = Q_r w_r; \quad \dot{m} = -w_r,$$

где  $Q_r$  — выделившееся в результате химической реакции количество теплоты на единицу массы. Скорость процесса сгорания определяется на основе моделей Магнуссена — Хартагера и модели когерентного пламени (CFM).

Расчеты проводились с помощью трехмерного CFD-кода FIRE, разработанного фирмой AVL List GmbH (Австрия) [3]. Ядро FIRE основано на численном методе контрольных объемов с использованием усовершенствованного алгоритма SIMPLE. Верификация математической модели осуществлялась на основании экспериментальных индикаторных диаграмм.

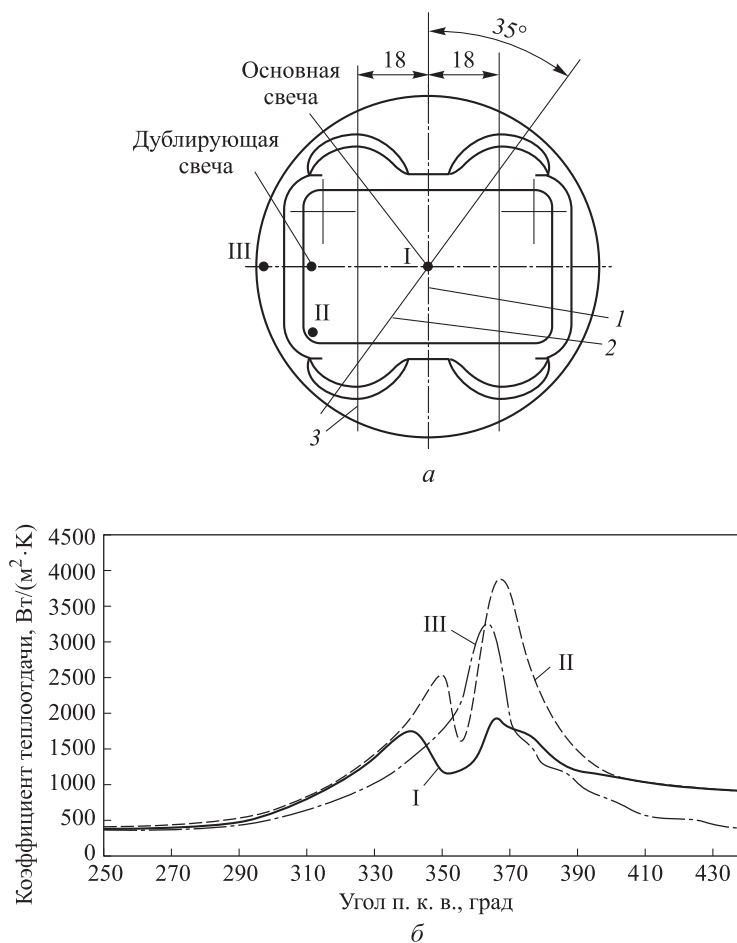
**Исследование локального теплообмена в КС АПД.** Некоторые конструктивные особенности АПД (дублированная система зажигания и др.) позволяют рассмотреть возможность повышения их эффективных показателей за счет индивидуальных моментов зажигания для свечей совместно с профилированием впускных каналов [4, 5].

**Теплообмен в цилиндре авиационного поршневого двигателя с учетом конструктивных особенностей поршня и головке двигателя.** Объектом исследования является четырехтактный, двухцилиндровый авиационный двигатель HKS700E с оппозитным расположением цилиндров с искровым зажиганием, размерностью  $D/S = 8,5/6,0$  см/см, степенью сжатия 11,3 и взлетной мощностью 44,7 кВт при частоте вращения коленчатого вала 6200 мин<sup>-1</sup>.

В реальном рабочем цикле двигателя на поверхностях выточек, а также у кромок вытеснителя (рис. 1, а) имеет место локальное перетекание газа, генерируемое неровностями и рельефом указанных поверхностей и влияющее на интенсивность локального теплообмена.

Изменение коэффициента теплоотдачи  $\alpha$  в зависимости от угла поворота коленчатого вала (п.к.в.) в точке III на периферийной части огневого днища поршня (рис. 1, б) имеет вид, типичный для поршневых двигателей [4], и характеризуется одним максимумом. В центральной части (точка I), а также на кром-

ке вытеснителя (точка II) таких максимумов два — до и после верхней мертвой точки (ВМТ). При этом в точке I значения этих максимумов довольно близки друг другу, а на кромке вытеснителя (точка II) — существенно различаются. Кроме того, на кромке вытеснителя были зафиксированы максимальные (для данного цикла) значения  $\alpha$ . Такой характер изменения коэффициента теплоотдачи обусловлен полями скоростей, а также изменением направления потока газа после прохождения поршнем ВМТ.



**Рис. 1.** Характерные сечения (1, 2, 3) в объеме цилиндра и точки (I, II, III) на поверхности огневого днища поршня АПД НК8700Е (а), зависимость коэффициента теплоотдачи в точках I, II, III (режим работы  $N_e = 41,7$  кВт,  $n = 5800$  мин<sup>-1</sup>) от угла п.к.в. (б)

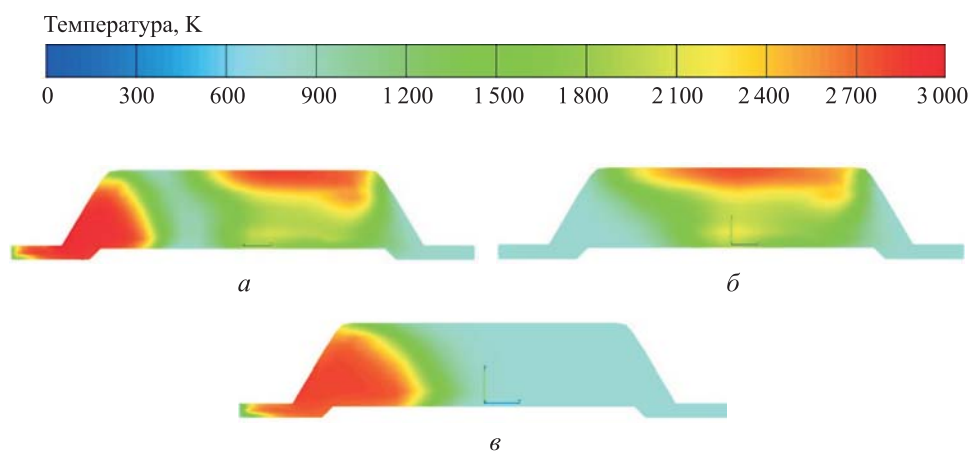
**Влияние индивидуальных моментов подачи искры на свечи зажигания на процессы локального теплообмена.** Наличие в цилиндре АПД двух свечей зажигания вызвано прежде всего требованиями безопасности — при отказе одной из свечей двигатель должен сохранять работоспособность. В двигателе М9ВФ ( $D/S = 10,5/13$  см/см; степень сжатия 6,5; 9 цилиндров, расположенных звездообразно; взлетная мощность 268 кВт при частоте вращения коленчатого вала

1860 мин<sup>-1</sup>) со сферической КС свечи расположены симметрично относительно плоскости, проходящей через оси цилиндра и впускного клапана.

В случае установки индивидуальных углов опережения зажигания наименьшие тепловые нагрузки (снижение на 10...15 %) достигаются при углах опережения зажигания  $\varphi_{0.31} = -20^\circ$  и  $\varphi_{0.32} = -25^\circ$  п.к.в. При этом снижение эффективной мощности по сравнению со случаем одновременного срабатывания свечей зажигания ( $\varphi_{0.3} = -25^\circ$  п.к.в.) незначительно ( $N_e$  снижается на 2,7 кВт). При уменьшении угла опережения зажигания начальной искры менее  $20^\circ$  п.к.в. и увеличении разности между моментами искрообразования на свечах более  $5^\circ$  п.к.в. происходит значительное снижение мощности.

Аналогичные исследования выполнялись для АПД НКС700Е. Стоит отметить, что в отличие от двигателя М9ФВ НКС700Е характеризуется несимметричным расположением свечей зажигания (см. рис. 1, а). Расчетно-экспериментальные исследования работы двигателя проводились для случаев включения только боковой свечи, только центральной свечи и двух свечей одновременно (крейсерский режим,  $n = 5500$  мин<sup>-1</sup>).

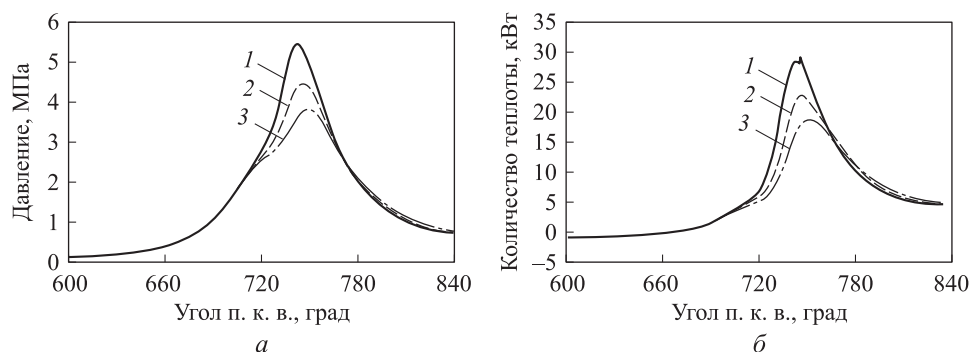
Локальные поля температур рабочего тела в сечении 1 (см. рис. 1, а) КС данного двигателя приведены на рис. 2. Несмотря на более интенсивное воспламенение смеси от боковой свечи в момент вспышки (рис. 2, в), что связано с



**Рис. 2.** Поля температур в сечении КС двигателя НКС700Е (положение поршня  $730^\circ$  п.к.в.) при различной активации свечей зажигания:

а — полное зажигание, б — центральная свеча, в — боковая свеча ( $720^\circ$  п.к.в. соответствует ВМТ)

повышенной турбулизацией потока в этой области, распространение пламени по всему объему КС при активации центрального источника воспламенения происходит быстрее (см. рис. 2). Последнее обстоятельство объясняется более выгодным расположением центральной свечи и находит свое отражение на индикаторной диаграмме двигателя и зависимости количества теплоты, переданной в стенки КС, от угла п.к.в. (рис. 3).



**Рис. 3.** Индикаторные диаграммы (а) и зависимости количества теплоты, переданного в стенки КС (б) двигателя HKS700E ( $n = 5500 \text{ мин}^{-1}$ ) при различном срабатывании свечей зажигания ( $720^\circ$  п.к.в. соответствуют ВМТ):

1 — полное зажигание; 2 — центральная свеча; 3 — боковая свеча

На основании результатов расчетов отмечается значительное влияние местоположения источника воспламенения топливовоздушной смеси на характеристики АПД HKS700E. При этом отключение центральной свечи зажигания приводит к падению на 22 % мощности двигателя с одновременным увеличением удельного эффективного расхода от  $317 \text{ г}/(\text{кВт} \cdot \text{ч})$  до  $380 \text{ г}/(\text{кВт} \cdot \text{ч})$ .

**Закрутка потока на впуске в цилиндр двигателя.** Значительное влияние на локальный теплообмен и эффективность протекания процесса сгорания в цилиндре двигателя имеет форма впускных каналов, позволяющая создать вращательное движение свежего заряда в КС в вертикальной (течение типа «squish») и горизонтальной («swirl») плоскостях [6].

В качестве объекта исследования был выбран АПД Rotax-912UL (оппозитный четырехцилиндровый безнаддувный с диаметром цилиндра  $D = 79,5 \text{ мм}$ , ходом поршня  $S = 61 \text{ мм}$ , мощностью  $N_e = 59,6 \text{ кВт}$  при частоте вращения коленчатого вала  $n = 5800 \text{ мин}^{-1}$ ).

В работе предложено несколько форм впускного канала, обеспечивающих различную степень закрутки свежего заряда в цилиндре двигателя.

Результаты расчета течения газа в впускных каналах АПД Rotax-912UL следующие: вихревые числа в горизонтальной и вертикальной плоскостях  $D_n = -0,72$  и  $T_n = 0,52$ , коэффициент расхода  $\mu = 0,5$  (для исходного канала) и  $D_n = -1,89$ ,  $T_n = 0,05$ , коэффициент расхода  $\mu = 0,36$  (для модификации).

Заметно, что с увеличением интенсивности закрутки потока в самом канале растет вихревое число в горизонтальной плоскости  $D_n$ . Одновременно изменяется направление движения воздуха в вертикальной плоскости — как следствие, величина вихревого числа в вертикальной плоскости  $T_n$  тоже уменьшается. Отметим, что предложенная модификация впуска характеризуется меньшим коэффициентом расхода, чем исходный канал, это объясняется возросшим сопротивлением за счет интенсификации вихря. Тем не менее проведенные расчеты влияния закрутки на показатели двигателя М9ФВ [6] позволяют предположить повыше-

ние эффективных показателей двигателя путем интенсификации вихревого движения в КС. Кроме того, в оптимальных условиях удастся существенно понизить вероятность возникновения детонации, снизив тем самым октановое число принимаемого бензина на 4–5 единиц [7].

**Заключение.** Рассмотрено влияние особенностей работы АПД на процессы локального теплообмена.

Определены термические граничные условия со стороны высокотемпературного рабочего тела для разработанной конструкции поршня с вытеснителем и выточками под впускными и выпускными клапанами, наличие которых приводит к интенсификации турбулентности в зонах их расположения. Изменение коэффициента теплоотдачи в рабочем цикле двигателя носит ярко выраженный локальный характер. При этом локальные коэффициенты теплоотдачи существенно отличаются друг от друга не только по величине, но и по характеру изменения в течение рабочего цикла.

Отмечено значительное влияние местоположения и индивидуальных моментов срабатывания источников воспламенения топливовоздушной смеси на характеристики АПД. Так, в двигателе М9ФВ оптимальный подбор индивидуальных углов опережения зажигания для основной и дублирующей систем ( $\varphi_{0.31} = -20^\circ$  и  $\varphi_{0.32} = -25^\circ$  п.к.в.) позволяет снизить на 10...15 % тепловые нагрузки на основные детали КС при незначительном (на 2,7 кВт) падении мощности. В НКS700E работа на периферийной свече приводит к снижению на 22 % мощности по сравнению с полным зажиганием с одновременным увеличением на 19,9 % удельного эффективного расхода, при этом количество теплоты, отводящееся в стенки КС, снижается на 30,5 %.

Для повышения эффективности рабочего процесса АПД Rotax-912 рассмотрена возможность вместе с изменением углов опережения зажигания для двух свечей интенсифицировать вихревое движение рабочего тела в цилиндре до величины  $D_n = 1,89$ .

Выполненное в работе математическое моделирование рабочих процессов в АПД и определение условий теплообмена в КС позволяет достичь существенной экономии времени при доводке двигателя.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Патанкар С. Численное решение задач теплопроводности и конвективного теплообмена при течении в каналах / пер. с англ. М.: Изд-во МЭИ, 2003. 311 с.
2. Кавтарадзе Р.З. Теория поршневых двигателей. Специальные главы. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. 719 с.
3. FIRE. Users manual version 2014. AVL List GmbH. Graz (Austria), 2016. (License agreement for use of the simulation software AVL FIRE between Bauman Moscow State Technical Univ. and AVL List GmbH, 2014).
4. Моделирование локального нестационарного теплообмена в камере сгорания и теплонапряженного состояния поршня авиационного двигателя / Р.З. Кавтарадзе, А.А. Зеленцов, З.Р. Кавтарадзе, Ю.Н. Никитин, Л.А. Финкельберг // Известия РАН. Энергетика. 2010. № 2. С. 133–151.

5. *Моделирование* процессов переноса, сгорания и образования оксидов азота в авиационном поршневом двигателе с дублированной системой зажигания / Р.З. Кавтарадзе, Д.О. Онищенко, А.А. Зеленцов, Л.А. Финкельберг, А.Н. Костюченков // Известия РАН. Энергетика. 2012. № 6. С. 135–152.
6. *Исследование* влияния предварительной закрутки потока на характеристики авиационного поршневого двигателя / А.И. Ланшин, Л.А. Финкельберг, А.Н. Костюченков, А.А. Зеленцов, М.А. Баканов // Вестник ВГТУ. 2012. Т. 8. № 2. С. 96–99.
7. *Зеленцов А.А.* Анализ влияния особенностей рабочих процессов на эффективные показатели авиационных поршневых двигателей // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2013. № 4. С. 81–93.

**Зеленцов Андрей Александрович** — канд. техн. наук, доцент кафедры «Поршневые двигатели» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

**Просьба сослаться на эту статью следующим образом:**

Зеленцов А.А. Анализ процессов теплообмена в камерах сгорания авиационных поршневых двигателей с искровым зажиганием // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2018. № 1. С. 75–82. DOI: 10.18698/0236-3941-2018-1-75-82

**ANALYSIS OF HEAT TRANSFER PROCESSES IN COMBUSTION CHAMBERS OF AIRCRAFT PISTON ENGINES WITH SPARK IGNITION**

A.A. Zelentsov

zelentsov.aa@gmail.com

**Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation**

---

**Abstract**

The article considers the features of local heat transfer in aircraft piston engines with individual spark plug moments and intensive swirl of inlet charge. The importance of using real piston and cylinder head geometry is noticed. The numeric investigation of working processes in combustion chambers is carried out using three-dimensional non-stationary equations of energy, motion, diffusion and continuity in Reynolds form with addition of  $k-\zeta-f$  turbulence model. AVL FIRE software is used to obtain the numerical results. As a result, the local heat fluxes, heat transfer coefficients and gas temperatures for the real piston geometry (displacer and valve recess shapes) were obtained. Reduce of heat stress up to 10...15 % is also possible when individual spark moments with maximum interval  $5^\circ$  are realized

**Keywords**

*Aircraft piston engine, working process, local heat transfer, mathematical simulation*

Received 12.05.2017

© BMSTU, 2018

---

*This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research (Grant No. 15-08-01238-a)*

---

**REFERENCES**

- [1] Patankar S.V. Computation of conduction and duct flow heat transfer innovative research. CRC Press, 1991.
- [2] Kavtaradze R.Z. Teoriya porshnevykh dvigateley. Spetsial'nye glavy [Theory of piston-type engines. Special chapters]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2008. 719 p.
- [3] FIRE. Users manual version 2014. AVL List GmbH. Graz (Austria), 2016. (License agreement for use of the simulation software AVL FIRE between Bauman Moscow State Technical Univ. and AVL List GmbH, 2014).
- [4] Kavtaradze R.Z., Zelentsov A.A., Kavtaradze Z.R., Nikitin Yu.N., Finkel'berg L.A. The modeling of local heat transfer in the combustion chamber and heat stress state of the aircraft engine piston. *Izvestiya RAN. Energetika* [Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Power Engineering], 2010, no. 2, pp. 133–151 (in Russ.).
- [5] Kavtaradze R.Z., Onishchenko D.O., Zelentsov L.A., Finkel'berg L.A., Kostyuchenkov A.N. Modeling of transfer, combustion and nitrogen oxide formation processes in piston-type engine with duplicate ignition system. *Izvestiya RAN. Energetika* [Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Power Engineering], 2012, no. 6, pp. 135–152 (in Russ.).
- [6] Lanshin A.I., Finkel'berg L.A., Kostyuchenkov A.N., Zelentsov A.A., Bakanov M.A. Investigation of inlet flow swirl influence on the gasoline aviation piston engine characteristics. *Vestnik VGTU*, 2012, vol. 8, no. 2, pp. 96–99 (in Russ.).
- [7] Zelentsov A.A. Analysis of influence of working process features on effective characteristics of aircraft piston engines. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Mashinostr.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mech. Eng.], 2013, no. 4, pp. 81–93 (in Russ.).

**Zelentsov A.A.** — Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Piston Engines Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

**Please cite this article in English as:**

Zelentsov A.A. Analysis of Heat Transfer Processes in Combustion Chambers of Aircraft Piston Engines with Spark Ignition. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Mashinostr.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mech. Eng.], 2018, no. 1, pp. 75–82 (in Russ.). DOI: 10.18698/0236-3941-2018-1-75-82