

УДК 004.65

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕПЛОВОГО СОСТОЯНИЯ ПОРШНЕЙ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

Н. Ю. Дударева¹, А. Е. Кишалов², Р. В. Кальщиков³,
Д. А. Ахмедзянов⁴, А. А. Гапонова⁵

¹natalia_jd@mail.ru, ²kishalov@ufanet.ru, ³roman_for_work@mail.ru, ⁴ada@ugatu.ac.ru, ⁵gaponova_00@list.ru

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ)

Поступила в редакцию 25.06.2019

Аннотация. Представлены результаты разработки методики 3D-численного термодинамического моделирования процесса нестационарного нагрева поршня двигателя внутреннего сгорания в CAE-системе ANSYS CFX. Для разработки методики моделирования и проверки ее работоспособности сначала были проведены физические эксперименты на специально изготовленном безмоторном стенде, в котором были измерены температуры поршня и газодинамические параметры обдуваемого поршень воздуха. В результате сравнения результатов 3D-моделирования с данными физического эксперимента было установлено, что разработанная методика моделирования показывает качественное и количественное совпадение с результатами безмоторных испытаний. Максимальная относительная погрешность моделирования не превышает 3 %.

Ключевые слова: поршень; двигатель внутреннего сгорания; тепловое состояние; нестационарный теплообмен; численное моделирование.

ВВЕДЕНИЕ

Современный уровень развития науки и техники требует вывода на рынок высококачественной продукции с минимальной себестоимостью и в кратчайшие сроки. Поэтому для ускорения проведения исследований повсеместно внедряются технологии численного моделирования, позволяющие еще на стадии проектирования предсказывать характеристики готовых изделий с достаточно высокой точностью задолго до изготовления первых образцов и проведения испытаний изделий.

На сегодняшний день в современных двигателях внутреннего сгорания широкое распространение получили поршни из алюминиевых сплавов. В перспективе объем

применения этих сплавов будет только увеличиваться [1]. Детали из алюминиевых сплавов обладают множеством достоинств: низкой массой, достаточно высокой прочностью и небольшой стоимостью. Однако у таких деталей имеется существенный недостаток – низкая теплостойкость поверхностей. Этот дефект зачастую проявляется в виде прогаров на днище поршней, что влечет за собой поломку всего двигателя [2, 3]. Для решения этой проблемы обычно пользуются различными методами: прикрепляют накладки из жаропрочных материалов, наносят теплостойкие керамические покрытия или используют методы модификации поверхностей, типа микродугового оксидирования [4–6]. Проверка эффективности вышеперечисленных методов в ре-

жиме моторных испытаний оказывается не всегда удачной. Исследование теплового состояния деталей двигателей на моторных стендах дает наиболее точную информацию, но требует значительных материальных и временных затрат. Также достаточно полную информацию можно получить, проводя эксперименты на безмоторных стендах, но точность получаемой информации во многом будет зависеть от степени приближения условий проведения эксперимента к реальным параметрам на двигателе. Но и даже в этом случае экспериментальные исследования требуют достаточно высоких финансовых и временных затрат. Поэтому *цель данной работы* заключается в разработке методики моделирования процесса нестационарного теплообмена в поршне двигателя внутреннего сгорания.

1. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

1.1. ФИЗИЧЕСКИЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

Сначала, до разработки методики и проведения моделирования, был проведен физический эксперимент на безмоторном стенде.

Исследованию подвергались опытные образцы поршня двигателя внутреннего сгорания (рис. 1, *а*). Поршень был выполнен из сплава марки AlSi25CuNiMg, который маркируется по зарубежной классификации M244 [7]. Перед проведением исследований поверхность днища поршня зачернялась при помощи нагара от газовой горелки (рис. 1, *б*).

Для исследования теплового состояния поршня был спроектирован специальный безмоторный стенд (рис. 2). Схема стенда представлена на рис. 3. Принцип работы этого стенда заключался в том, что днище поршня нагревалось тепловизором, который моделировал сгорание топливовоздушной смеси в двигателе. Вентилятор, расположенный с противоположной стороны днища поршня, обеспечивал моделирование системы продувки реального двухтактного двигателя.

Тепловое состояние поршня фиксировалось при помощи телевизора (рис. 2), который измерял и записывал изменение темпе-

ратуры днища поршня с внутренней стороны (со стороны «картера»).



Рис. 1. Экспериментальный поршень:
а – в исходном состоянии;
б – с зачерненной поверхностью

Кроме этого было разработано специальное приспособление для стенда (рис. 4), которое устанавливалось на неподвижном столе и состояло из двух стоек и защитного экрана. Стойки были выполнены из глины с добавлением армированного материала. Каждая стойка имела отверстие для установки в них поршня, а между глиняными стойками устанавливался металлический защитный экран, который предназначался для предотвращения попадания прямых потоков горячего воздуха на тепловизор.

Для исследования на безмоторном стенде поршень предварительно устанавливали в приспособление и подвергали его днище нагреву. Для нагрева использовался тепловизор *Makita HG5012* с потоком горячего воздуха ~ 500 °С. Температура потока горячего воздуха на выходе из тепловизора контролировалась терморпарой, установленной в цифровой мультиметр *APPA 207*. Скорость потока измерялась по замеренному полному и статическому давлению при помощи трубки Пито. Для моделирования продувки использовался вентилятор *Deepcool Xfan80*. Скорость потока холодного воздуха от вентилятора измерялась анемометром *THERMO-ANEMOMETER AZ Instrument 8908*. Процесс нагрева и максимальная температура фиксировались с помощью тепловизора *Seek Thermal*.

Нагрев поршня осуществлялся до достижения стационарной температуры. После нагрева поршень охлаждался вентилятором до комнатной температуры. Эксперимент повторялся дважды.

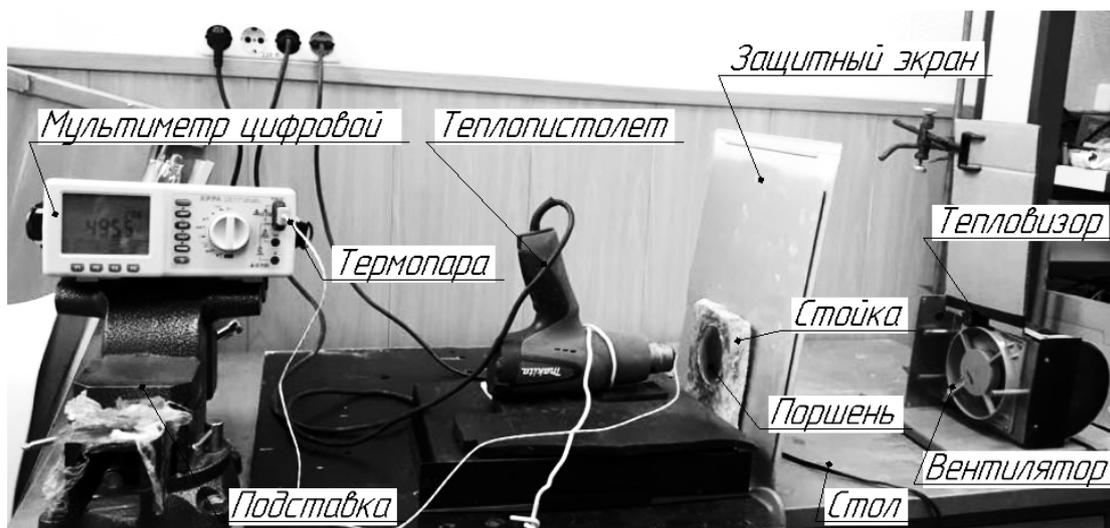


Рис. 2. Экспериментальный безмоторный стенд

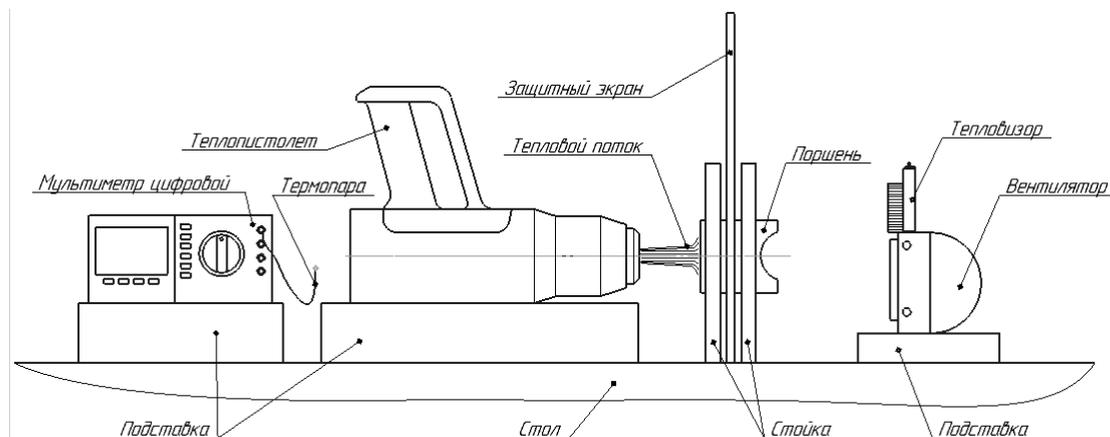


Рис. 3. Схема безмоторного стенда

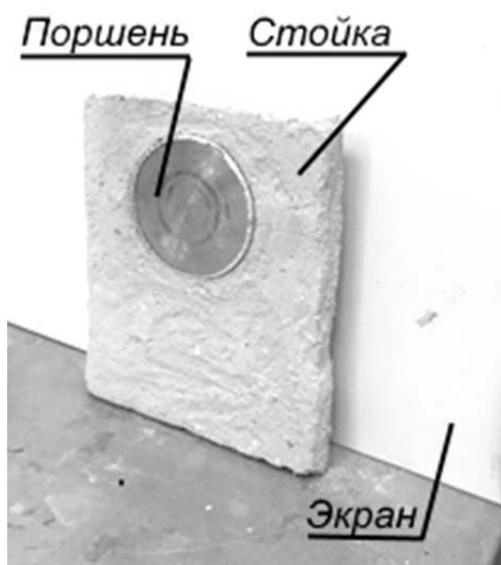


Рис. 4. Специальное приспособление

Значение средней температуры по днищу поршня высчитывалось на основе данных тепловизора с учетом площадей поверхности, имеющих различную температуру (рис. 5).

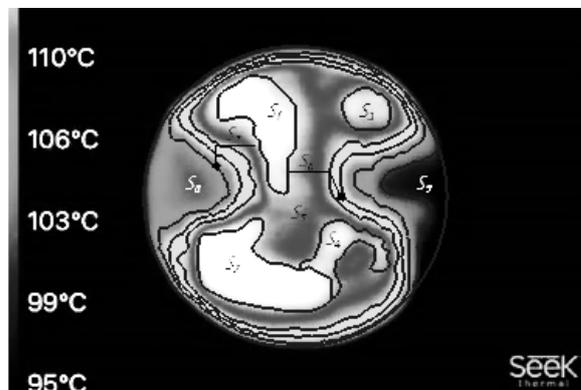


Рис. 5. Вид поршня через тепловизор с обозначением температурных зон

Площади зон с различными температурами были вычислены с помощью программы КОМПАС-3D (рис. 5), а средняя температура определялась по формуле:

$$t_{\text{ср}} = \frac{t_1 \cdot S_1 + t_2 \cdot S_2 + \dots + t_n \cdot S_n}{S_{\Sigma}},$$

где t_n – температура n -го участка, °С; S_n – площадь n -го участка, мм²; S_{Σ} – общая площадь днища поршня, мм².

1.2. МЕТОДИКА МОДЕЛИРОВАНИЯ В ANSYS CFX

Для проведения моделирования был выбран программный продукт 3D-термогазодинамического численного моделирования – ANSYS CFX [8–10]. Для этого сначала в CAD системе SolidWorks была построена 3D-твердотельная геометрическая модель поршня (рис. 6), области окружающей среды с потоком воздуха от тепlopистолета и области окружающей среды с потоком воздуха от вентилятора. Сборка всех трех геометрических моделей представлена на рис. 7.

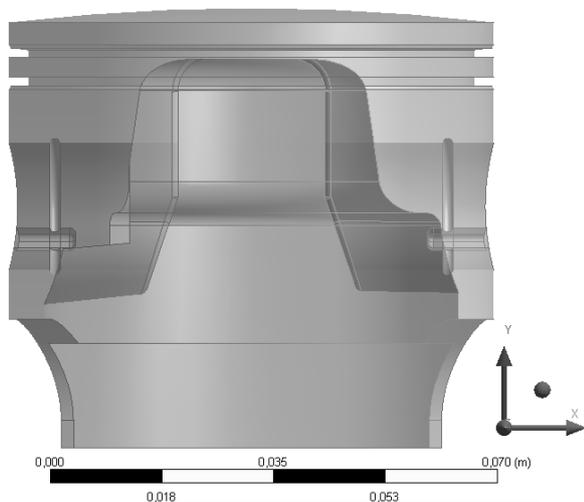


Рис. 6. Геометрическая модель поршня ДВС

На моделях окружающей среды со струей подогретого воздуха от тепlopистолета (левая часть модели, рис. 7) и с потоком воздуха от вентилятора (правая часть модели, рис. 7) построена тетраэдрическая неструктурированная конечно-объемная сетка.

Для более точного моделирования пограничного слоя и процессов теплоотдачи на поверхностях, прилегающих к твердым поверхностям поршня, были построены

10 структурированных слоев из призматических элементов. Количество элементов сетки составило 2,5 и 3,5 млн элементов для моделей со струей подогретого воздуха и с потоком воздуха от вентилятора, соответственно. На модели поршня была построена сетка из параллелепипедов, суммарное количество элементов составило 0,5 млн элементов.

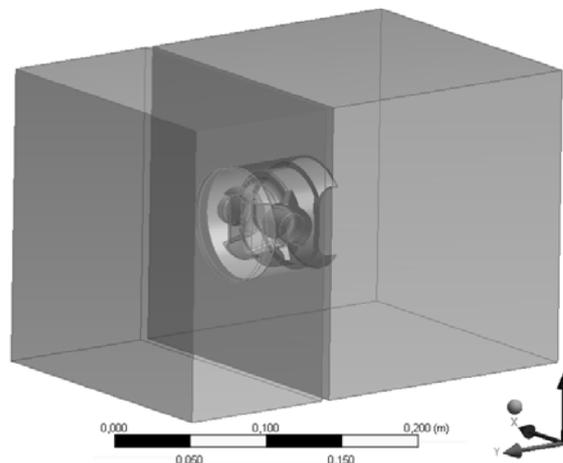


Рис. 7. Сборка геометрических моделей

Затем эти модели были импортированы в CFX-Pre. Для моделей воздуха окружающей среды были выбраны жидкие домены с рабочим телом – *Air Ideal Gas*, теплофизические свойства которого (теплоемкость, динамическая вязкость и теплопроводность) были заданы как функции от температуры. Для модели поршня был выбран твердый домен с созданным рабочим телом – *AlSi*, теплопроводность которого также задавалась как функция от температуры.

На левой границе модели окружающей среды со струей подогретого воздуха от тепlopистолета было задано граничное условие *Inlet*, где при помощи профиля скоростей и температур задан ввод струи подогретого воздуха: полная температура струи 500 °С, скорость струи 18,77 м/с (данные соответствуют замерам на безмоторном стенде). Граница модели, прилегающая к экрану, была задана как адиабатическая стенка с прилипанием пограничного слоя. Информация от домена окружающей среды к домену поршня передается при помощи соответствующего интерфейса, установленного на торце поршня. Остальные границы домена – *Opening* с заданным избыточным давлением 0 Па и температурой 19,5 °С.

Аналогичным задавались граничные условия для домена окружающей среды с потоком воздуха от вентилятора: полная температура струи $19,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, скорость струи $7,8\text{ м/с}$. Модель переноса тепла – *Total Energy*. Модель турбулентности – *SST*, так как она одинаково хорошо моделирует процессы в ядре потока и вблизи твердых стенок. Модель переноса тепла для домена поршня – *Thermal Energy*. В качестве *Reference Pressure* выбрано атмосферное давление в момент проведения эксперимента – 735 мм рт. ст.

Моделирование проводилось в режиме *Transient*, с варьируемым шагом по времени от $0,001\text{ с}$ (на первых 20 секундах) до $0,1\text{ с}$ (на последних 200 секундах). Расчетное время переходного процесса составило $\tau = 1140\text{ с}$, что соответствует ориентировочному времени выхода поршня на установившийся тепловой режим ($\sim 19\text{ мин.}$)

В начальный момент времени в домене поршня и доменах окружающей среды была установлена температура $22\text{ }^{\circ}\text{C}$, что соответствует условиям проведения эксперимента.

Все расчеты проводились в течение 280 часов на 16-ядерном компьютере с тактовой частотой $2,67\text{ ГГц}$ и объемом оперативной памяти 96 Гб . В результате расчетов в процессе нагрева поршня контролировались поля температур на задней поверхности поршня (аналогично проведенному физическому эксперименту на безмоторном стенде) в зависимости от времени моделирования.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

На рис. 8 приведены вектора скоростей с раскраской по температуре и поля температур на поверхности поршня для переходного процесса. Показана струя горячего воздуха, набегающая на днище поршня с внешней стороны (его средняя температура составляет порядка $132\text{ }^{\circ}\text{C}$), и поток воздуха от вентилятора, обдувающего внутреннюю поверхность поршня (температура этого потока – $19,5\text{ }^{\circ}\text{C}$).

В таблице приведено сравнение результатов физического эксперимента (эксперимент №1 и эксперимент №2) и результатов моделирования в ANSYS CFX.

Из полученных результатов видно, что несмотря на сложность геометрической модели и самого моделируемого процесса, результаты моделирования качественно и количественно соответствуют физическим экспериментальным данным. При одинаковой продолжительности процесса нагрева температурные поля на задней поверхности поршня по результатам моделирования имеют ту же конфигурацию, что и поля, полученные в эксперименте (табл. 1).

При небольшой продолжительности процесса (до 5 минут) на фотографиях с тепловизора присутствуют нагретые участки защитного экрана в виде температурных градиентов в верхней части фотографий. На более поздних снимках нагретые участки защитного экрана на фотографиях не видны из-за более крупного шага шкалы температур. Также на фотографиях с тепловизора можно заметить несимметричность полей температур, что объясняется погрешностями при центровке безмоторного стенда. При этом в результатах моделирования при помощи ANSYS CFX все результаты симметричны.

На рис. 9 приведена зависимость средней по площади температуры на задней поверхности поршня от времени переходного процесса (от времени нагрева).

Температурное состояние поршня в начале процесса нагрева моделируется достаточно точно, средняя относительная погрешность моделирования составляет $0,33\text{ \%}$ ($0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$). В конце процесса нагрева погрешность моделирования несколько увеличивается до $2,8\text{ \%}$ ($3,3\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Результаты моделирования, полученные при помощи ANSYS CFX в конце процесса нагрева, несколько больше значений средних по площади температур, полученных в результате экспериментальных исследований. Возможно это связано с тем, что при моделировании не учитывался лучистый теплообмен поршня с окружающей средой.

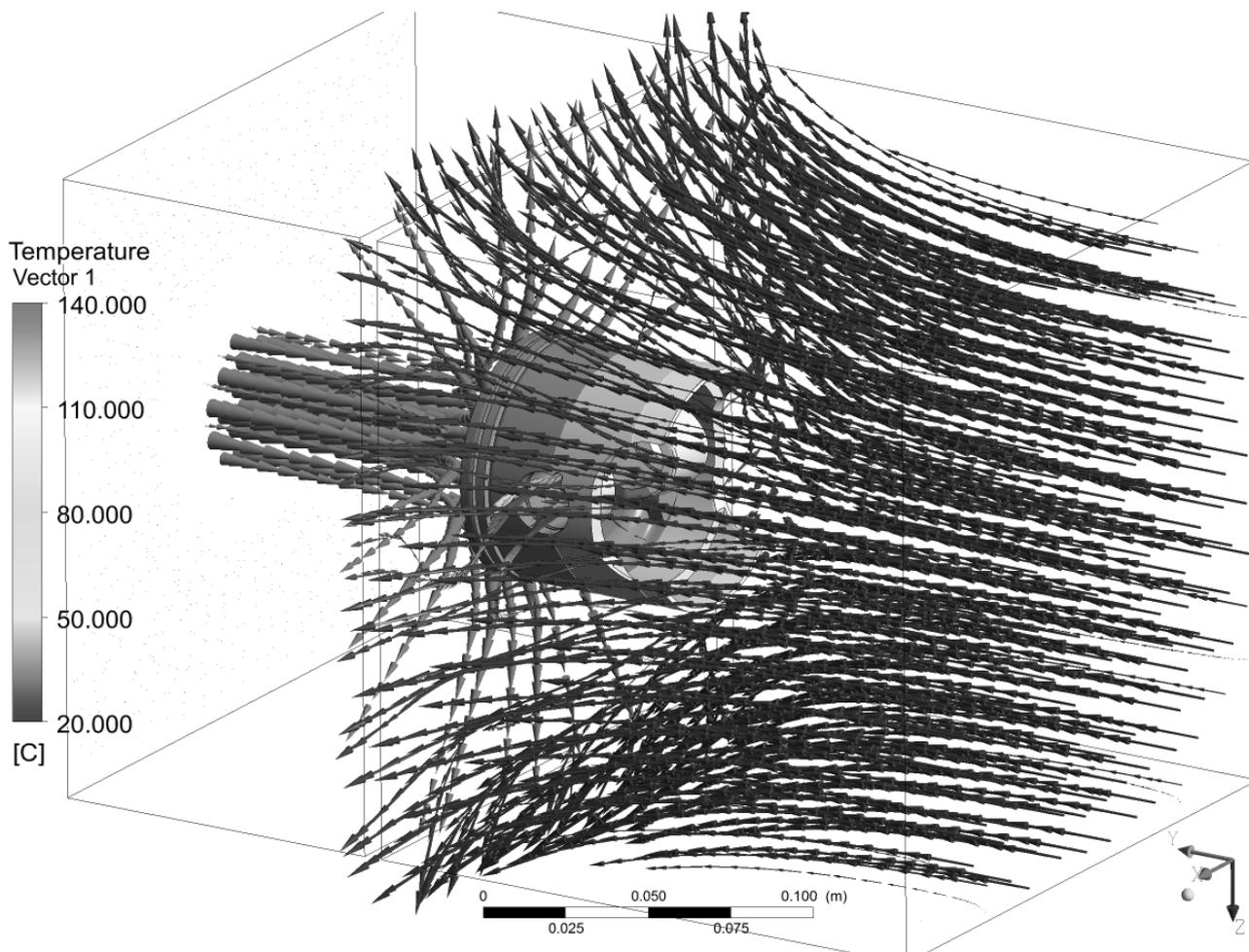
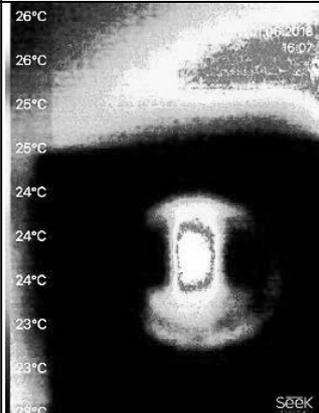
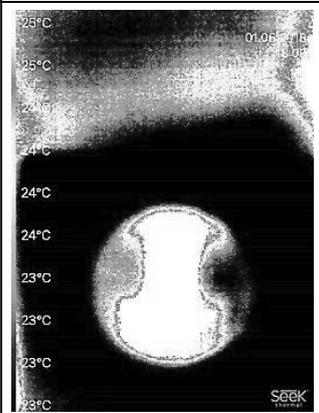
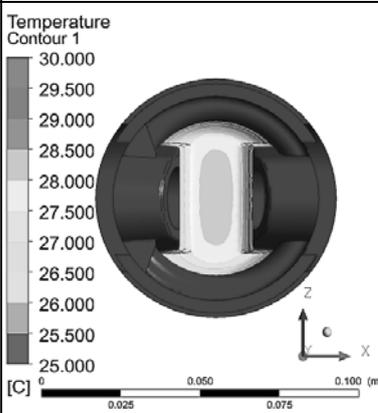


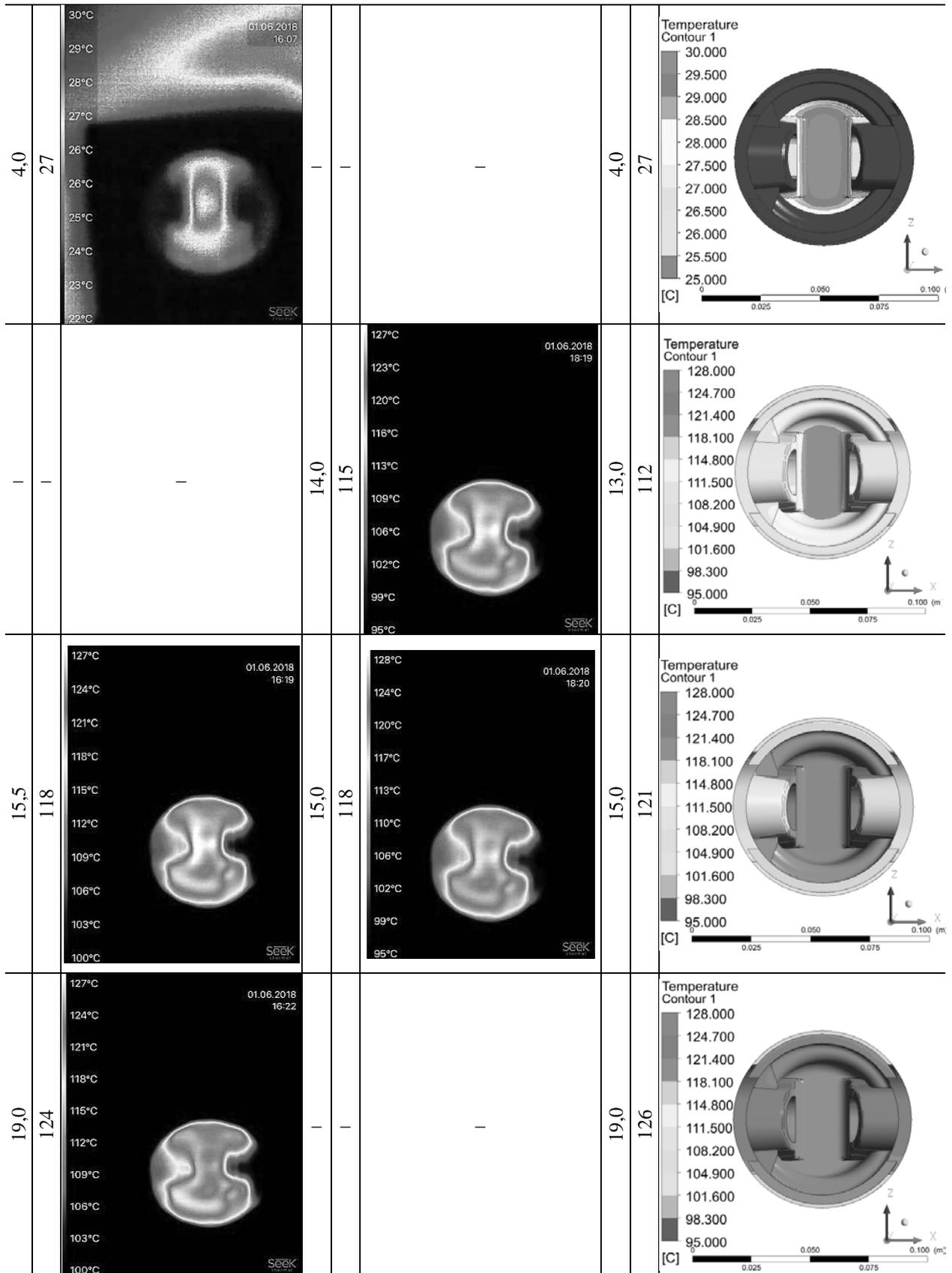
Рис. 8. Вектора скоростей в расчетной области

Таблица 1

Сравнение результатов эксперимента и численного моделирования

Эксперимент №1			Эксперимент №2			Моделирование в ANSYS		
τ , мин	t_{cp} , C	Фото	τ , мин	t_{cp} , C	Фото	τ , мин	t_{cp} , C	Изображение
1	2	3	4	5	6	7	8	9
3,5	25		3,0	26		3,0	26	

Окончание табл. 1



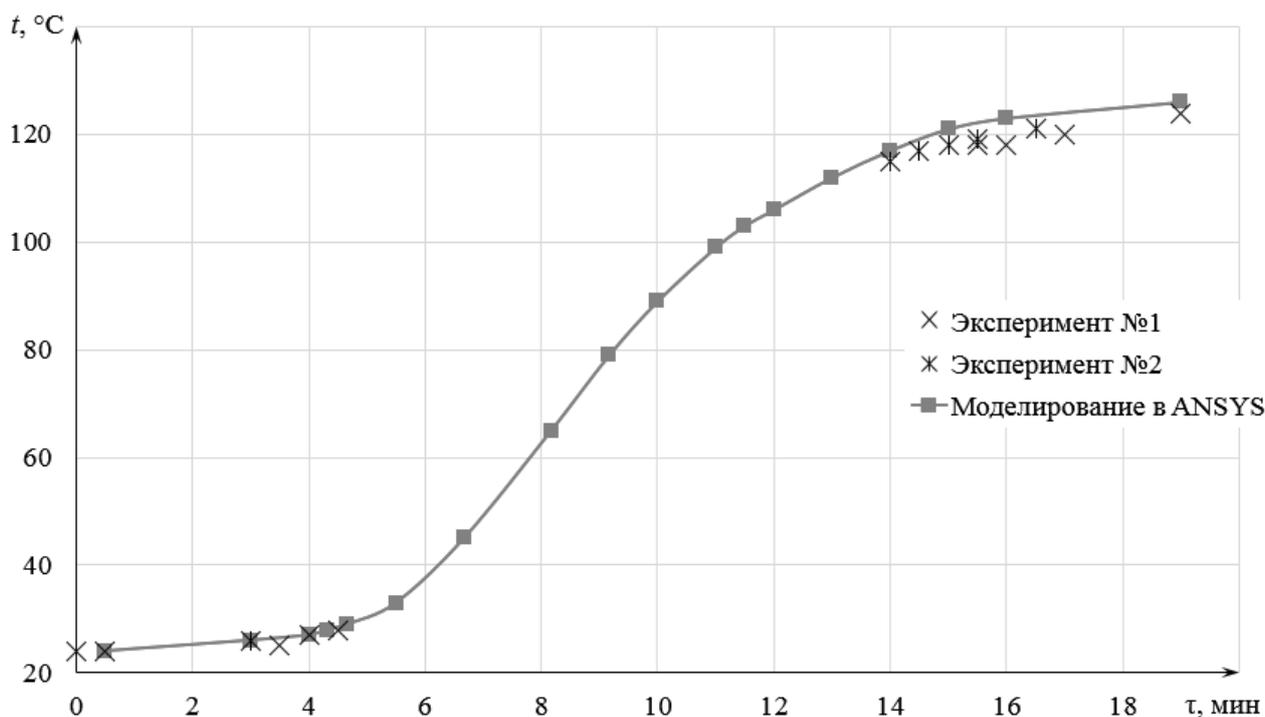


Рис. 9. Средняя температура задней поверхности поршня в зависимости от времени переходного процесса

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного исследования разработана методика 3D-численного термогазодинамического моделирования процесса нестационарного теплообмена в поршне двигателя внутреннего сгорания. Разработан безмоторный стенд, позволяющий исследовать температурное состояние элементов двигателя. Были проведены численный и физические эксперименты, в результате которых получены значения температур под днищем поршня в процессе его нагрева. Результаты моделирования качественно и количественно соответствуют результатам физических экспериментов. Максимальная относительная погрешность не превышает 3 %. Разработанная методика численного моделирования позволяет в короткие сроки, без применения дорогостоящего оборудования и с достаточной степенью точности, исследовать тепловое состояние элементов двигателей внутреннего сгорания на установившихся и переходных процессах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Никитин В. И., Тихонов А. К., Никитин К. В. О концепции развития производства автомобильных отливок из Al-сплавов // *Литейное производство*. 2012. № 8. С. 2–8. [V. I. Nikitin, A. K. Tikhonov and K. V. Nikitin, "Concept of pro-

duction development of automobile castings from Al-alloys", (in Russian), in *Liteinoe proizvodstvo*, no. 8, pp. 2-8, 2012.]

2. Пылев В. А., Белогуб А. В., Ободец Д. К. Прогнозирование ресурсной прочности поршня легкомоторного авиационного двигателя // *Двигатели и энергоустановки аэрокосмических летательных аппаратов*. 2013. № 9 (106). С. 177–182. [V. A. Pylev, A. V. Belogub, D. K. Obodec, "Prediction of the life of the piston of a light-engine aircraft engine", (in Russian), in *Engines and power installations of aerospace flying vehicles*, no. 9 (106), pp. 177-182, 2013.]

3. **Характерные** эксплуатационные дефекты деталей цилиндропоршневой группы [Электронный ресурс]. ООО «Авиагамма». URL: <http://www.aviagamma.ru/defect.html>, свободный (дата обращения: 11.11.2018). [Limited Liability Company «Aviagamma» (2018, Nov. 11), *Typical operational defects of parts of the cylindro-piston group, NoSQL databases* [Online], (in Russian). Available: <http://www.aviagamma.ru/defect.html>]

4. Никитин М. Д., Кулик А. Я., Захаров Н. И. Теплозащитные и износостойкие покрытия деталей дизелей. Л.: Машиностроение, 1977. 168 с. [M. D. Nikitin, A. U. Kulik, N. I. Zakharov, *Heat-shielding and wear-resistant coatings for diesel parts*, (in Russian). Leningrad: Mashinostroenie, 1977.]

5. **Experimental** study of the micro-arc oxide coating effect on thermal properties of an aluminium alloy piston head / N. Yu. Dudareva et. al. // *Journal of Engineering Science and Technology Review*. 2015. Vol. 8, № 6. Pp. 10-13 [N. Yu. Dudareva et. al., "Experimental study of the micro-arc oxide coating effect on thermal properties of an aluminium alloy piston head", in *Journal of Engineering Science and Technology Review*, vol. 8, no. 6, pp. 10-13, 2015.]

6. Цымбалистая Т. В. Применение теплозащитных покрытий для двигателей внутреннего сгорания (обзор) // *Автоматическая сварка*. 2012. № 6. С. 38–43. [T. V. Cymbalistaya, "Application of thermal barrier coatings for internal combustion engines (review)", (in Russian), in *Avtomaticheskaya svarka*, no. 6, pp. 38-43, 2012.]

7. **MANHE GmbH.** Pistons and engine testing. Germany: Springer, 2012. 297 p. [MANHE GmbH, *Pistons and engine testing*. Germany: Springer, 2012.]

8. **Ахмедзянов Д. А., Кишалов А. Е.** Расчеты сложных геометрических моделей узлов авиационных ГТД в программном комплексе ANSYS CFX // Вестник УГАТУ. 2009. Т. 13, № 1 (34). С. 48–57. [D. A. Akhmedzanov, A. E. Kishalov, Calculations of complex geometric models of aviation GTE units in ANSYS CFX software package, (in Russian), in *Vestnik UGATU*, vol. 13, no. 1 (34), pp. 48-57, 2009.]

9. **Ахмедзянов Д. А., Кишалов А. Е.** Верификация расчета процесса теплообмена в программном комплексе ANSYS CFX // Вестник УГАТУ. 2009. Т. 13, № 2 (35). С. 226–233. [D. A. Akhmedzanov, A. E. Kishalov, "Verification of heat transfer process calculation in ANSYS CFX software package", (in Russian), in *Vestnik UGATU*, vol. 13, no. 2 (35), pp. 226-233, 2009.]

10. **Кишалов А. Е., Кудоярова В. М., Игнатьев О. И.** Подходы к моделированию теплового состояния в программных комплексах для трехмерного твердотельного численного моделирования ANSYS MULTIPHYSICS и ANSYS CFX // Молодежный Вестник УГАТУ. 2012. № 4 (5). С. 37–43. [A. E. Kishalov, V. M. Kudayarova, O. I. Ignatev, "Thermal state modeling approaches in software complexes for three-dimensional solid-state numerical simulation of ANSYS MULTIPHYSICS и ANSYS CFX", (in-Russian), in *Molodegny Vestnik UGATU*, no. 4 (5), pp. 37-43, 2012.]

ОБ АВТОРАХ

ДУДАРЕВА Наталья Юрьевна, доц. каф. двигателя внутреннего сгорания. Дипл. инженер-механик (УГАТУ, 1994). Канд. техн. наук по тепловым двигателям (УГАТУ, 1999). Иссл. в обл. повышения надежности деталей двигателей внутреннего сгорания применением покрытий, формируемых методом микродугового оксидирования.

КИШАЛОВ Александр Евгеньевич, доц. каф. авиац. тепло-техники и теплоэнергетики УГАТУ. Дипл. инж. по авиационным двигателям и энергетическим установкам (УГАТУ, 2006). Канд. техн. наук по тепловым, электроракетным двигателям и энергоустановкам летательных аппаратов (УГАТУ, 2010). Иссл. в обл. рабочих процессов в авиационных ГТД на установившихся и неустойчивых режимах, разработки математических моделей сложных технических объектов, САПР авиационных ГТД.

КАЛЬЩИКОВ Роман Владимирович, инж. каф. двигателя внутреннего сгорания. Дипл. инженера (УГАТУ, 2009). Готовит дисс. в обл. повышения надежности деталей ДВС с применением покрытий, формируемых методом микродугового оксидирования.

АХМЕДЗЯНОВ Дмитрий Альбертович, проф., декан ФАДЭТ. Дипл. инж. по авиационным двигателям и энергетическим установкам (УГАТУ, 1997). Д-р техн. наук по тепловым, электроракетным двигателям и энергоустановкам летательных аппаратов (УГАТУ, 2007). Иссл. в обл. рабочих процессов в авиационных ГТД на установившихся и неустойчивых режимах, разработки математических моделей сложных технических объектов, САПР авиационных ГТД.

ГАПОНОВА Анастасия Андреевна, инж. ПАО «ОДК-УМПО». Дипл. бакалавра (УГАТУ, 2016). Дипл. магистра (УГАТУ, 2018).

METADATA

Title: Development of the simulation technique of the piston heat conditions of the internal-combustion engine

Authors: N. Yu. Dudareva¹, A. E. Kishalov², R. V. Kalschikov³, D. A. Akhmedzyanov⁴, A. A. Gaponova⁵

Affiliation:

Ufa State Aviation Technical University (UGATU), Russia.

Email: ¹natalia_jd@mail.ru, ²kishalov@ufanet.ru, ³roman_for_work@mail.ru, ⁴ada@ugatu.ac.ru, ⁵gaponova_00@list.ru

Language: Russian.

Source: Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), vol. 23, no. 3 (85), pp. 46-54, 2019. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

Abstract: The development results of 3D numerical thermogas dynamic simulation of the non-stationary heating process of the internal combustion engine piston in the ANSYS CFX CAE system are presented in this paper. Physical experiments were first carried out on a specially made motorless stand, in which piston temperatures and the gas-dynamic parameters of the blown air piston were measured. The measurement results of the physical experiment were compared with the simulation results. As a result of the data comparison it was found that the developed modeling methodology showed a qualitative and quantitative coincidence with the results of motorless tests. The maximum relative error of modeling does not exceed 3%.

Key words: piston; internal combustion engine; thermal condition; non-stationary heat exchange; numerical simulation

About authors:

DUDAREVA, Natalia Yurievna, Associate Professor of the Department of Internal Combustion Engines of USATU, Dipl. Engineer-mechanic (USATU, 1994). Ph. D. Candidate of Internal combustion engines (USATU, 1999).

KISHALOV, Alexander Evgenievich, Associate professor of aviation heat power engineering department of USATU. Graduate engineer of aircraft engines and power plants (USATU, 2006). Ph. D. Candidate of thermal, electrical rocket engines and power plants of aircraft (USATU, 2010).

KALSCHIKOV, Roman Vladimirovich, Engineer of Internal Combustion Engines of USATU, Dipl. Engineer (USATU, 2009).

AKHMEDZYANOV, Dmitry Albertovich, Dean of the aviation engines, energy and transport faculty of USATU, professor of the aviation engines department. Ph. D. Candidate of aircraft engines and power plants (USATU, 1997). Dr. of Tech. Sci. (USATU, 2007).

GAPONOVA, Anastasia Andreevna, Ing. Public Joint-Stock Company "United Engine-Building Corporation - Ufa Engine-Building Production Association". Dipl. Bachelor (USATU, 2016). Dipl. Master's degree (USATU, 2018).